

ANÁLISIS DE ECOEFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTOS DE BAJO CARBONO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN DE CLINKER

ECO-EFFICIENCY ANALYSIS OF LOW-CARBON CEMENT PRODUCTION BY REPLACING CLINKER

Yanay Ruíz Rosa^{1}, Elena R. Rosa Domínguez², Sofía Sánchez Berriel¹,
Lubia Castillo Hernández², José F. Martirena Hernández³ y Nydia Suppen Reynaga⁴*

¹ Departamento de Arquitectura. Facultad de Construcciones. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM). Facultad de Construcciones. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

⁴ Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable de México. Calzada de los Jinetes 22, Las Arboledas, 54026 Tlalhepantla, México.

Recibido: Octubre 4, 2016; Revisado: Octubre 20, 2016; Aceptado: Enero 27, 2017

RESUMEN

En este trabajo se realiza la evaluación ambiental de la producción de cemento en la Fábrica Siguaney y el cálculo de los indicadores de ecoeficiencia según la norma ISO 14045, se utiliza la metodología Recipe mediante el software SimaPro 8.1. Para evaluar los indicadores de ecoeficiencia se relacionan los resultados de las categorías de impacto con indicadores de valor monetario, que permiten evaluar la situación actual y la repercusión de las modificaciones propuestas. Como resultados se obtienen los perfiles ambientales del cemento P-35 (caso base) y de los cementos de bajo carbono (LC3-35 y LC3-50), obtenidos de la sustitución de clinker por las arcillas caoliníticas a partir de estudios realizados por investigadores del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), así como los perfiles de ecoeficiencia. La comparación del cemento P-35 con los de bajo carbono demostró resultados favorables en ocho categorías de impacto, sin embargo las relacionadas con la toxicidad aumentan debido al incremento del consumo de electricidad que se produce con la molienda de

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Yanay Ruíz, Email: yanay@uclv.cu

los materiales para la obtención de las arcillas calcinadas, provocando mayor cantidad de emisiones al aire de compuestos orgánicos volátiles. Se observa que existe una mejora de la ecoeficiencia en 6 de los 8 indicadores, debido a una disminución simultánea de los costos de producción y los impactos ambientales. El cemento LC3-50 muestra los mejores resultados. La metodología utilizada posibilita la evaluación de alternativas relacionadas con la sustitución de materiales en la construcción.

Palabras clave: cemento de bajo carbono, análisis de ciclo de vida, ecoeficiencia

ABSTRACT

This work carries out the environmental evaluation of the cement production in Siguane Factory as well as the calculation of the Eco-efficiency indicators according to the ISO 14045 norms; the Recipe methodology was used including 18 impact categories and the SimaPro 8.1 software was also used. In order to evaluate the eco-efficiency indicators according to the ISO 14045 norm, the results of the impact categories are related to the monetary value indicators, allowing the evaluation of the current situation as well as the consequences of the suggested modifications. As a result, the environmental profiles of P-35 cement (base case) were obtained as well as those of the low carbon ones (LC3-35 y LC3-50) resulting from the clinker substitution by kaolinitic clay after some studies carried out by CIDEM researchers; and the eco-efficiency profiles. The comparison made between P-35 cement and the low-carbon cements showed positive results in eight weather impact categories, however, toxicity-related ones rise due to the increase in electricity consumption connected to the grinding of materials to obtain burnt clay bringing about a greater amount of emissions of volatile organic compounds to the air. An improvement in the eco-efficiency of 6 out of 8 calculated indicators is observed due to a simultaneous decrease in the production costs and the environmental impacts. LC3-50 cement shows the best results. The methodology used permits to evaluate alternatives related to the material substitution in the construction sector.

Key words: low-carbon cement; life cycle assessment; eco-efficiency

1. INTRODUCCIÓN

El cemento, un material de naturaleza inorgánica cuya producción industrial se inició hacia la mitad del siglo XIX, sigue siendo hoy uno de los principales materiales de construcción. Pertenece a la categoría de los conglomerantes hidráulicos, es decir, productos que mezclados con agua, producen pastas capaces de adherirse a materiales rocosos y endurecerse progresivamente, incluso sin contacto con el aire, formando bloques compactos, resistentes a la acción del agua y con resistencias mecánicas de gran nivel (Chennoufi, 2010).

La necesidad de actuar a favor de un desarrollo más respetuoso con el medio ambiente y con el ser humano se ha convertido actualmente en un parámetro ineludible para nuestra sociedad. Ya sea mediante la normativa o por la presión social, la empresa se ve obligada en la actualidad a reforzar su política en materia de desarrollo sostenible.

Es por ello que en la producción de cemento se hace necesario implementar estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas estrategias destacan la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles, la reducción del factor de clinker, y más recientemente la captura y almacenaje del CO₂ (Chennoufi, 2010). Durante la manufactura de cemento, se calcula que del total de emisiones de CO₂, alrededor del 60 % es causado por la descarbonatación de las materias primas en la producción de clinker, y el restante 40 % proviene de la quema de combustible y el consumo de energía eléctrica (Vizcaíno, 2014); de ahí que la reducción del factor de clinker sea considerada la alternativa con mayor potencial a corto plazo para la reducción de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento. Esto se puede realizar a través del empleo de materiales sustitutos del Clinker (Vizcaíno, 2014), que garanticen las propiedades del cemento y al mismo tiempo mejoren el perfil medioambiental del mismo.

La cantidad de clinker que puede ser sustituido por materiales cementicios suplementarios (MCS) depende del tipo empleado. Los MCS tradicionalmente utilizados son desechos de procesos industriales, como las cenizas volantes, la microsílíce y las escorias de alto horno, además de puzolanas naturales como tobas zeolitizadas y cenizas volcánicas (Alujas, 2010). Estas alternativas deben ser evaluadas para cuantificar la reducción del impacto ambiental que se obtiene mediante estas sustituciones.

El uso del ACV en este sector puede servir para cuantificar el impacto del producto cemento y usarlo como una herramienta para la toma de decisiones en la selección de materiales con menor impacto ambiental y para optimizar el uso de recursos adoptando nuevas soluciones proyectuales (Arena, 2000; Suppen y Bart, 2005; León, 2010).

Los Indicadores de Ecoeficiencia permiten medir la relación entre el funcionamiento ambiental y el funcionamiento financiero de la empresa, para ciertos problemas ambientales globales, logrando identificar aquellas áreas de la empresa en las cuales se están provocando mayores desperdicios o pérdidas de recursos, así como posibles oportunidades de inversión, por esta razón, son considerados como una herramienta de toma de decisiones, de evaluación del funcionamiento de la empresa y de comunicación para inversionistas internos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se usaron dos metodologías: el análisis de ciclo de vida con estándar ISO 14040 (NC ISO, 2009) para la evaluación ambiental y la de análisis de ecoeficiencia con estándar ISO 14045 (ISO 14045, 2012) para el análisis económico combinado con los indicadores ambientales (figura 1). Es decir que además de registrar todas las entradas y salidas de las materias primas también se contabilizan indicadores de valor como el costo y el precio.

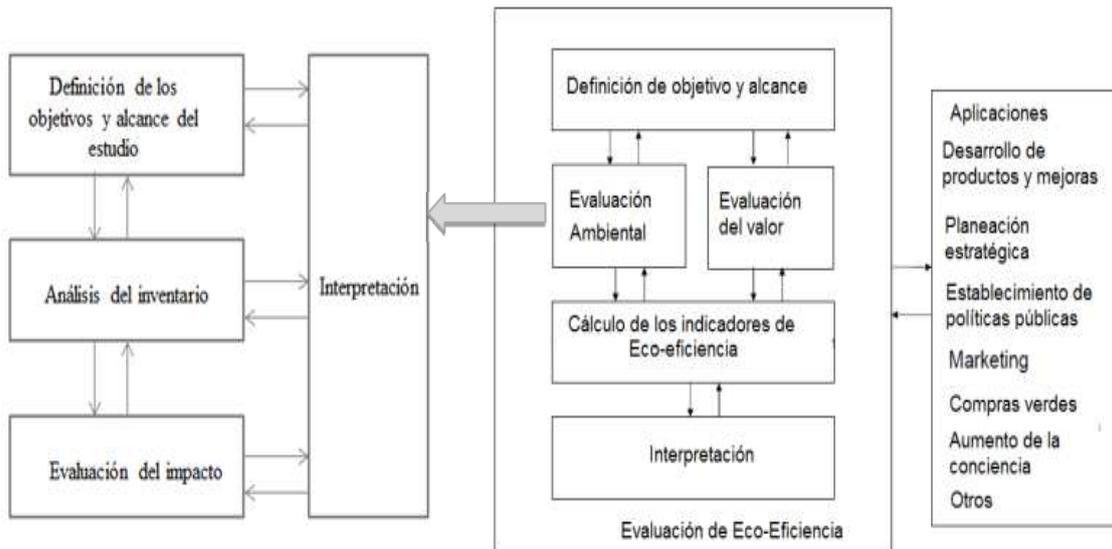


Figura 1. Combinación de las metodologías de ACV ISO 14040 (NC ISO, 2009) y Ecoeficiencia ISO 14045 (ISO 14045)

La metodología de evaluación de impacto seleccionada para el presente estudio es la Recipe (Goedkoop, 2009; Sánchez et al., 2016), dos grupos de categorías de impacto: uno de puntos intermedios, que incluye 18 categorías y otro de puntos finales que incluye 17 categorías de impacto y 3 categorías de daño (salud humana, ecosistemas y aumento del costo de recursos). El software utilizado es el SimaPro 8.1.

El presente trabajo se realizó en la Empresa de Cemento Siguaney, la cual se encuentra ubicada en la zona central de la Provincia de Sancti Spíritus, aproximadamente a unos 20 Km al norte de la capital provincial.

Con este estudio se pretende identificar y evaluar los impactos más significativos de los procesos de producción de los cementos P-35, LC3-35 y LC3-50, en la fábrica de Siguaney, que posibiliten el cálculo de indicadores de ecoeficiencia y establecer las bases para su posterior comparación. Para esto es imprescindible conocer las composiciones químicas de los cementos mencionados anteriormente, las cuales se muestran en la figura 2.

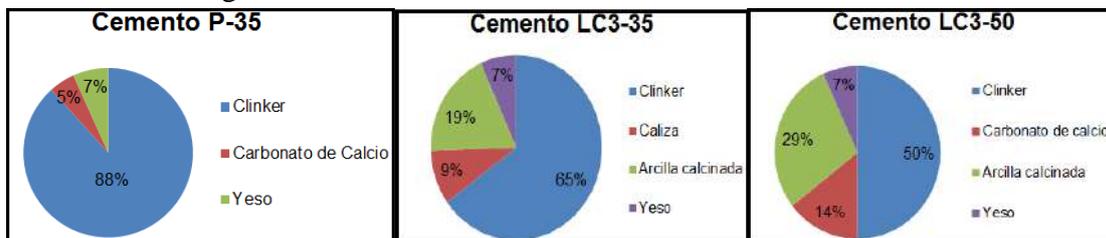


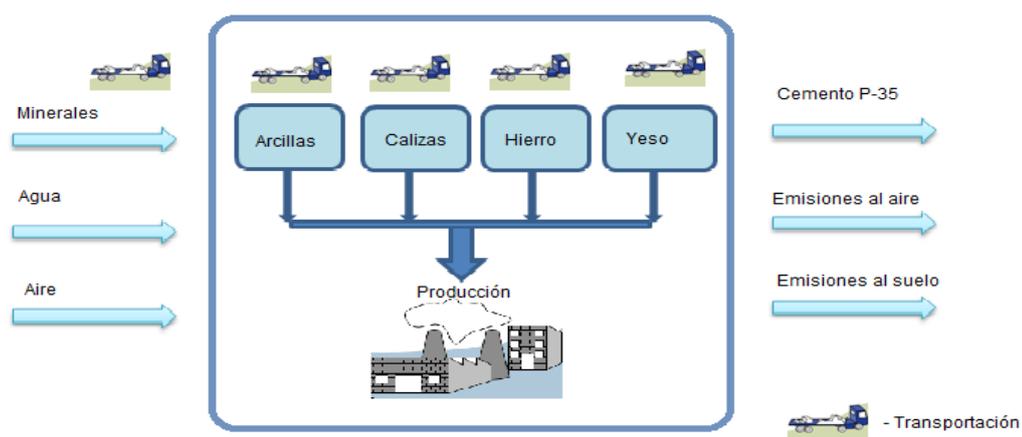
Figura 2. Composiciones de cemento P-35 (Martirena, 2010), LC3-35, LC3-50, (Martirena, 2015).

Para elaborar los inventarios se tomó como base los balances de materiales y energía de la producción anual del año 2015 que tiene la empresa actualmente (tabla 1), e incluyen desde la obtención de las materias primas, el transporte hasta el lugar de su manipulación, la preparación de los componentes, y finalmente, la obtención del cemento a punto para ser distribuido en el mercado.

Tabla 1. Inventario de los cementos P-35, LC3-35 y LC3-50

<i>Entradas</i>	<i>U.M</i>	<i>P-35</i>	<i>LC3-35</i>	<i>LC3-50</i>
<i>Naturaleza</i>				
H ₂ O	litros	402,64	302,14	227,99
Aire	tonelada	1,82	1,34	1,03
<i>Tecnosfera</i>				
Caliza	tonelada	0,92	0,73	0,64
Arcilla	tonelada	0,16	0,12	0,09
Hierro	tonelada	0,05	0,04	0,03
Yeso	tonelada	0,07	0,07	0,07
Arcilla Calcinada	tonelada		0,19	0,29
Electricidad,	KWh	111,69	111,69	111,69
Combustible (Crudo cubano)	tonelada	0,07	0,05	0,04
<i>Salidas</i>				
<i>Productos</i>				
Cemento P-35	tonelada	1	1	1
<i>Emisiones</i>				
Polvo	tonelada	0,02	0,02	0,02
H ₂ O	tonelada	421,24	310,09	238,53
NO _x	tonelada	0,003	0,002	0,002
CO ₂	tonelada	0,63	0,46	0,36
SO ₂	tonelada	0,01	0,007	0,006

El alcance del presente estudio es de la cuna a la puerta (figura 3) ya que se concluye cuando el cemento ya está listo para la carga a granel y comienza con la obtención de sus materias primas.

**Figura 3.** Diagrama de los límites del sistema

La unidad funcional de este estudio es la producción de una tonelada de cemento, considerando diferentes cantidades de Clinker en la Fábrica de cemento de Siguaney, El flujo de referencia es una tonelada de cemento (Ruíz, 2015). Para el cálculo de los indicadores de ecoeficiencia se tendrán en cuenta los resultados del ACV, seleccionándose aquellas categorías de impacto que resulten más significativas, Los indicadores de ecoeficiencia se calcularán de acuerdo a la ecuación 1.

$$\text{Indicador de ecoeficiencia} = \frac{\text{valor del producto o servicio}}{\text{inf luencia ambiental}} \quad (1)$$

Como indicador de valor se utiliza el costo de producción, El mismo se obtiene a partir de la determinación de los costos de las materias primas y portadores energéticos de la empresa para la producción de los tres tipos de cemento considerados en el estudio (Ruíz, 2015),

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la conformación de los inventarios, los resultados obtenidos en los balances de materiales y energía son adaptados a la Unidad Funcional (1 tonelada de cemento), La figura 4 ilustra la contribución de cada uno de los procesos involucrados en la producción de cemento P-35 a cada una de las categorías de impacto evaluadas mediante Recipe (midpoint). Los procesos que presentan un porcentaje de mayor afectación, generalmente son: la generación de energía, las emisiones asociadas al proceso de producción de cemento y el consumo de combustibles fósiles.

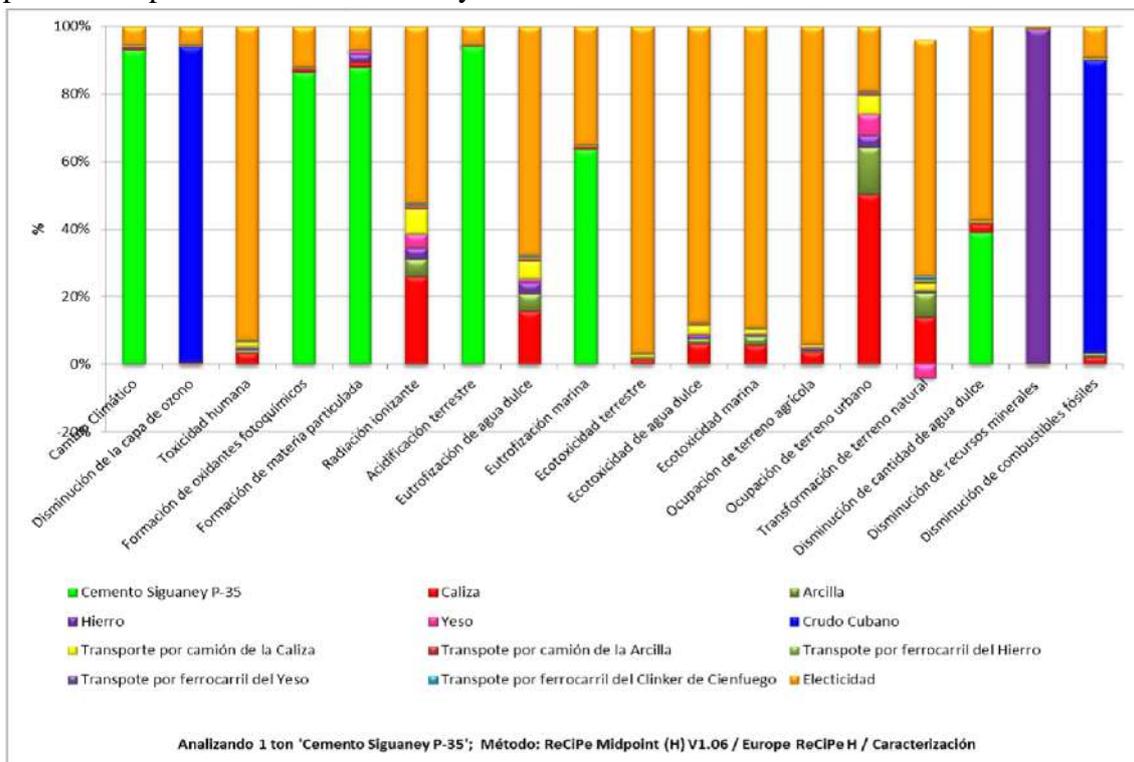


Figura 4. Perfil ambiental, Caracterización del cemento base (P-35)

Se aprecia que las emisiones del propio proceso de producción relacionadas con la combustión del crudo contribuyen con un mayor porcentaje a las categorías cambio climático, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, acidificación terrestre y eutrofización marina.

La producción de electricidad contribuye con un mayor porcentaje en 7 categorías de impacto: toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina, radiaciones ionizantes, ocupación de terreno agrícola y disminución de la cantidad de agua dulce.

La comparación de los perfiles ambientales de los tres tipos de cemento se puede observar en la figura 5 constatándose que estos tienen diferentes comportamientos en cada una de las categorías de impacto.

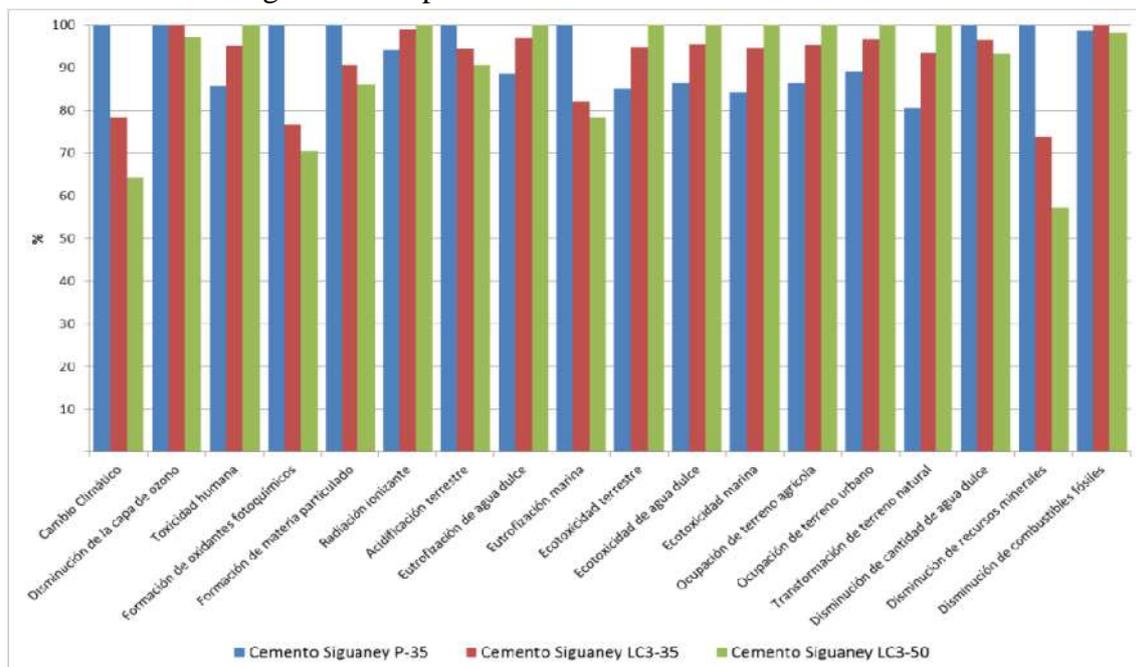


Figura 5. Comparación de perfiles ambientales expresados en porcentaje (Recipe punto medio)

En 8 de las 18 categorías de impacto (cambio climático, disminución de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, acidificación terrestre, eutrofización marina, transformación de uso de terreno y recursos minerales) los resultados son más favorables cuando se produce el cemento de bajo carbono, lo anterior ocurre por una disminución en la producción del clinker, el cual se sustituye por arcilla calcinada, esta última no contiene CaCO_3 por lo que se reducen las emisiones de CO_2 , NO_x y además se consume menos crudo y menos hierro.

Las mayores contribuciones en las categorías relacionadas con la toxicidad y la ecotoxicidad, se deben al ligero incremento en el consumo de electricidad, en el proceso por la introducción de la arcilla calcinada, que es necesario triturar antes de su incorporación al proceso, Los resultados en la categoría combustibles fósiles son muy similares, ligeramente superiores en los cementos de bajo carbono debido a la predominancia en Cuba de una matriz energética basada en el uso de combustibles fósiles.

Se decide calcular los indicadores de ecoeficiencia para aquellas categorías que tienen una contribución al impacto ambiental con un orden de magnitud considerable y que muestran mayor variación entre los tipos de cemento considerados en el estudio, estas son: cambio climático, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, acidificación terrestre, ecotoxicidad marina, disminución de recursos minerales y disminución de los combustibles fósiles.

En el caso de la toxicidad humana y la ecotoxicidad marina se realizará la suma del resultado de los dos indicadores expresados como kg 1,4-DB eq.

De acuerdo a lo expresado los indicadores de ecoeficiencia calculados se muestran en las ecuaciones 2-8:

$$\text{Indicador 1} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg de CO}_2 \text{ eq}} \quad (2)$$

$$\text{Indicador 3} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg 1.4 DB eq}} \quad (3)$$

$$\text{Indicador 4} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg NMVOC}} \quad (4)$$

$$\text{Indicador 5} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg PM 10 eq}} \quad (5)$$

$$\text{Indicador 6} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg SO}_2 \text{ eq}} \quad (6)$$

$$\text{Indicador 9} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg de Fe eq}} \quad (7)$$

$$\text{Indicador 10} = \frac{\text{Costo de producción } \$ (\text{tipo de cemento})}{\text{Kg oil eq}} \quad (8)$$

En la tabla 2 se muestran los indicadores de ecoeficiencia para cada categoría de impacto para cada tipo de cemento, Se observa que existe una mejora de la ecoeficiencia en 6 de los 8 indicadores calculados, debido a una disminución simultánea de los costos de producción y de los impactos ambientales en cada una de las categorías de impacto, El cemento LC3-50 muestra los mejores resultados.

Tabla 2. Indicadores de Ecoeficiencia para los tres tipos de cemento

Indicadores de ecoeficiencia	Unidad	P-35	LC3-35	LC3-50
Indicador 1	\$/ kg CO ₂ eq	0,51	0,62	0,73
Indicador 3	\$/kg 1,4 DB eq	0,32	0,27	0,24
Indicador 4	\$/kg NMVOC	26,98	33,43	34,92
Indicador 5	\$/kg PM10 eq	43,79	45,90	46,37
Indicador 6	kg SO ₂ eq	10,39	10,58	10,60
Indicador 9	kg Fe eq	5,86	7,57	9,44
Indicador 10	kg oil eq	1,56	1,46	1,43

En el caso de los indicadores 3 y 10 los resultados no son favorables, Con respecto a la toxicidad existe un incremento del valor del indicador ambiental debido a un mayor consumo de electricidad por el proceso de molienda de los materiales necesarios para la arcilla calcinada, por lo que el resultado del indicador de ecoeficiencia disminuye.

En el caso del agotamiento de combustibles fósiles la disminución del costo de producción total no compensa los resultados que se obtienen para el indicador de impacto ambiental de forma tal que se logre el incremento de la ecoeficiencia aun cuando la cantidad de combustible usada en los procesos de producción de cemento y en la calcinación de la arcilla disminuyen.

Un análisis de los resultados obtenidos constata la necesidad de disminuir el consumo de electricidad en el proceso de molienda de los materiales para la producción de la arcilla calcinada mediante la optimización de este proceso o el uso de energías alternativas, Considerando que es posible reducir el consumo de electricidad en la planta si se logra una estrategia de molienda adecuada de los materiales para la fabricación de la arcilla calcinada se realizó un análisis de sensibilidad disminuyendo el consumo de electricidad en el proceso de molienda de los materiales para la fabricación de la misma.

En la figura 6 se aprecia que esta disminución a nivel global en el proceso modifica el perfil ambiental de la comparación, obteniéndose una disminución de la contribución del impacto ambiental en 17 de las 18 categorías para los cementos LC3 -35 y LC3-50 con respecto al P-35.

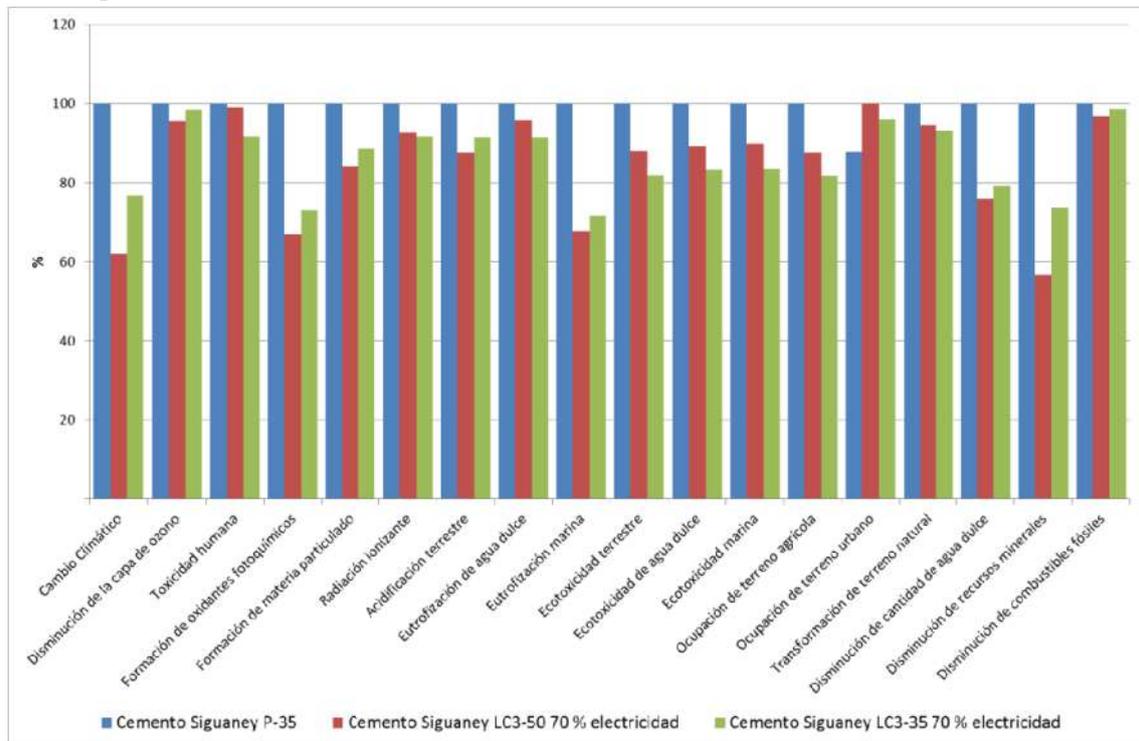


Figura 6. Comparación de los perfiles ambientales considerando una reducción en el consumo de electricidad

La reducción del impacto ambiental tiene una repercusión discreta en todos los indicadores de ecoeficiencia calculados, En todos los casos el cemento LC3-50 muestra los mejores resultados como se muestra en la figura 7.

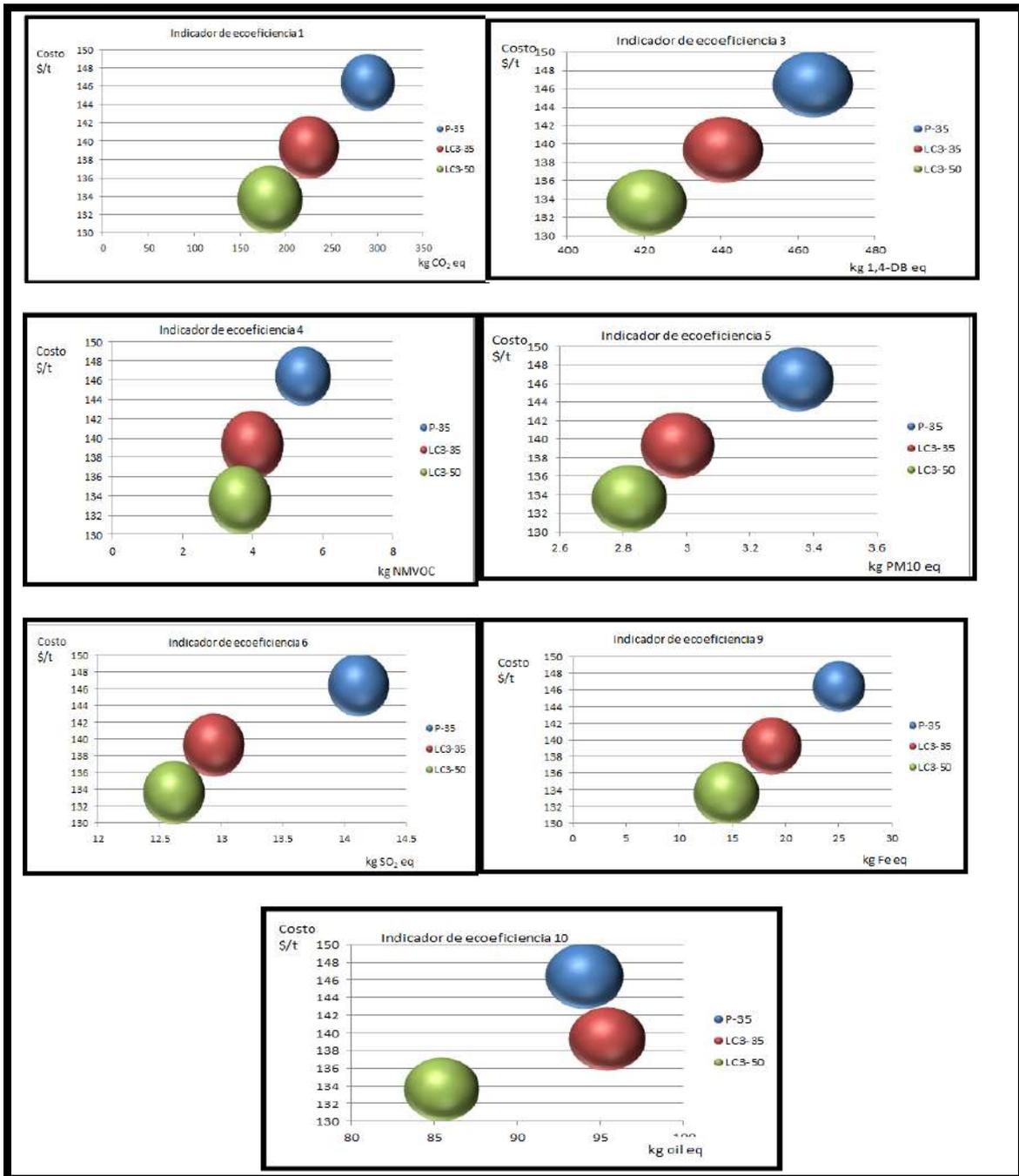


Figura 7. Representación gráfica de los indicadores de Ecoeficiencia

4. CONCLUSIONES

1. En Cuba se están llevando a cabo estudios para la sustitución de clinker por arcillas caoliníticas y se demuestra mediante la revisión del estado del arte, que el Análisis de Ciclo de Vida y su combinación con el Análisis de Ecoeficiencia permite cuantificar los impactos ambientales de la producción de cemento y evaluar la factibilidad económico-ambiental de la sustitución de materias primas tradicionales en este proceso.

2. Se demostró mediante la aplicación del ACV que la sustitución parcial del clinker, en el cemento P-35, por las arcillas caoliníticas para la producción de cementos de bajo carbono, disminuye los impactos ambientales en ocho categorías, sin embargo los efectos de la toxicidad y el agotamiento de combustibles fósiles tienden a incrementarse, Un comportamiento similar se observa en los indicadores de ecoeficiencia relacionados con estas categorías, Se constata que lo efectos adversos se deben fundamentalmente a un incremento del consumo de electricidad en el proceso de molienda de los materiales para la obtención de la arcilla calcinada.
3. Una estrategia en el proceso de molienda reduce el consumo de electricidad contribuyendo a la disminución de impacto en la mayoría de las categorías y a un incremento de todos los indicadores de ecoeficiencia considerados en el estudio.

REFERENCIAS

- Alujas, A., Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente,, Tesis presentada en opción del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, 2010,
- Arena, P,A,, Un instrumento para el análisis y evaluación ambiental de productos y tecnologías, El análisis de ciclo de vida, II–Adecuación para el sector edilicio,, 2000, pp,1-10,
- Chennoufi, L,H., Hilary, G., Breisinger, M., Boulet, E., Enfoque para la reconciliación del financiamiento de fábricas de cemento con objetivos referentes al cambio climático., IDB Publications, 2010,
- Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A.;Struijs J., Van Zelm R, ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009, <http://www.lcia-recipe.net>
- ISO 14045, Enviromental management, Ecoefciency assessment of product systems, Principles, requirements and guideline, 2012, pp, 1-38.
- León, R,M,, Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la producción de cemento: Caso de estudio Cementos Cienfuegos S,A, Tesis de grado Ingeniería Industrial, Universidad de Cienfuegos, Carlos Rafael Rodríguez, 2010.
- Martirena, F., Potencialidades de mejoramiento de la eficiencia en la producción de Cemento Portland en Cuba,, Informe, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2010, pp, 1-10.
- Martirena, F., Resultados de las primeras pruebas de durabilidad del cemento de bajo carbono,, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2015, pp, 5-12.
- NC ISO 14040, Gestión Ambiental, Análisis del ciclo de vida principios y estructura, Oficina Nacional de Normalización, Cuba, 2009, pp. 1-32.
- Ruíz, Y,, Análisis de Ciclo de Vida y Ecoeficiencia de la producción de cemento en la fábrica de Siguaney,, Tesis presentada en opción del Grado Científico de Master en Seguridad Tecnología y Ambiental de Procesos Químicos, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, 2015.

- Suppen, N., y Bart, V.H., Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable., 2005, pp. 1-39.
- Vizcaíno, L.M., Cemento de Bajo Carbono a partir del Sistema Cementicio Ternario Clinker-Arcilla Calcinada-Caliza., Tesis presentada en opción del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, 2012
- Sánchez, S., Favierb, A., Rosa, E., Sánchez, I.R., Machado, U., Heierlic, K., Scrivenerb, F., Martirena, F., Habert, G., Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcinced Clay Cement in Cuba., Journal of Cleaner Production, Vol. 124, 2016, pp. 361-369.