

Life Cycle Assessment of Zeolite-Based Cement Production at Laboratory Scale

Miguel Alcivar, Angel D. Ramirez, Ph.D., Mauricio Cornejo, Ph.D., Andrea Boero, M.Sc., Carlos Rodríguez, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, migaalci@espol.edu.ec, aramire@espol.edu.ec,
mcornejo@espol.edu.ec, aboero@espol.edu.ec, crodrigu@espol.edu.ec

Abstract–. The goal of this paper is to provide a basis for the sustainable development of the cement and construction industry. Both of them involve environmental impacts as a result of the increased demand of their products and services. There is a concern about the adverse effects to sustainable development, and this have led to develop more efficient technologies in the cement industry, however there are still several problems and associated consequences. Considering the above, the approach used in this paper is the environmental evaluation of cement production from alternative raw materials, in this case zeolites.

The methodology known as life cycle assessment (LCA) was used to quantify the environmental impacts. The study results showed that the environmental burden of the zeolite-based cement is higher than the ordinary Portland cement. Nevertheless, this outcome is due to the scale at which the study was conducted, therefore the environmental burden would be diminished if the production process is done on an industrial scale.

Keywords– zeolites, sustainable, LCA, cement, construction.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.250>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-639

Análisis del Ciclo de Vida de la Producción de Cemento a Base de Zeolitas a Escala de Laboratorio

Miguel Alcivar, Angel D. Ramirez, Ph.D., Mauricio Cornejo, Ph.D., Andrea Boero, M.Sc., Carlos Rodríguez, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, migaalci@espol.edu.ec, aramire@espol.edu.ec,
mcornejo@espol.edu.ec, aboero@espol.edu.ec, crodrigu@espol.edu.ec

Resumen. Este estudio busca servir de base para el desarrollo sostenible en la industria del cemento y la construcción, ambas implican impactos al medio ambiente como consecuencia de la creciente demanda de sus servicios y productos. La preocupación por estos efectos adversos al desarrollo sostenible, lleva a desarrollar tecnologías más eficientes en la industria cementera, pero aún hay muchos problemas y consecuencias latentes; en busca de soluciones, se propone la producción de cemento desde fuentes alternativas de materia prima, en este caso de zeolitas, y medir el impacto que esto conlleva al medio ambiente.

Para realizar esta cuantificación se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Se observa que la carga ambiental de este procedimiento es mayor que la del cemento Portland ordinario (CPO), pero esto se debe a la escala en que se realizó el estudio, y esta podría verse menguada cuando el procedimiento se realice a escala industrial.

Palabras clave-- zeolitas, sostenible, LCA, cemento, construcción.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el calentamiento global es uno de los grandes problemas del planeta, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a las actividades humanas. Se predice que éstas seguirán aumentando con el paso de los años, y que la concentración de CO₂ atmosférico podría superar las 800 ppm a finales del siglo [1] [2] [3].

La industria cementera es intensiva en el consumo de energía, gran parte de esta proviene de combustibles fósiles, esto lleva a relacionarla directamente con las emisiones de GEI; el CPO es uno de los más importantes materiales de construcción, por lo cual, la industria de producción de cemento es un sector con significativas emisiones de GEI [1]. La producción de cemento además tiene otras implicaciones ambientales, por ejemplo ciertas emisiones como NO_x y SO₂, que son precursoras de lluvia ácida, la eutrofización está asociada a estas emisiones de NO_x, y el smog de invierno a las de SO₂, entre otros impactos y consecuencias [1].

El ACV es una herramienta que permite cuantificar los impactos ambientales asociados a la obtención de un producto durante sus diferentes fases de producción. Un ACV implica seguir un producto desde la “cuna”, donde ocurre la extracción de materia prima, su fabricación y uso, hasta su “tumba” (ya sea, disposición final, reciclaje u otro fin). El alcance de un ACV puede modificarse, de tal manera que se siga al proceso solo hasta la “puerta” [4].

El cemento, en particular su producción, ha sido estudiado mediante el enfoque de ACV, identificado diversos efectos adversos al medio ambiente, así como posibles medidas de mitigación [1] [5]. Estas medidas están asociadas a: (1) uso de

mezclas alternativas donde se reemplaza hasta 30% del clinker en la mezcla, (2) reciclar polvo de CPO del horno, (3) secuestrar CO₂ en el polvo de CPO del horno [5]. La alternativa de cementos mezclados ha evidenciado mejores resultados, sin embargo se ven menguados debido a la demanda del cemento en la industria de la construcción, debido el volumen de producción es tal, que el impacto ambiental sigue siendo un problema latente [5].

Con el propósito de reducir las emisiones se han planteado soluciones alternativas a las ya propuestas, entre estas, los geopolímeros para suplir algunas aplicaciones del CPO y sus mezclas [6] [7].

Un geopolímero es un material sólido que se obtiene al combinar polvo de aluminosilicatos reactivos con una solución alcalina, que después pasa por un proceso de curado de su fase de gel [8, pp. 1-5].

Estudios de geopolímeros los presentan como alternativa al CPO y sus presentaciones como mezclas [6] [7]. Por lo que desde el punto de vista técnico puede ser factible. No obstante, se han realizados pocos estudios acerca del impacto ambiental de su producción, incluso hay evidencia de que puede ser similar al de la producción de CPO y sus mezclas [9]. De igual manera dependiendo de la composición de la materia prima y activadores para producir geopolímeros, se podría encontrar alguna mezcla que reduzca potencialmente los efectos adversos al medio ambiente [10].

El objetivo de este estudio es determinar el desempeño ambiental de la producción a escala de laboratorio, de geopolímeros a partir de zeolitas extraídas de la Cordillera Chongón-Colonche, en Ecuador. Para esto se utilizará la metodología de ACV. Se prevé que los resultados podrán ser utilizados como base al establecimiento de criterios de sostenibilidad en construcción.

II. METODOLOGÍA

A. Definición del alcance

Se define 1 kg de composición óptima del geopolímero, como unidad funcional (UF). Para estudiar el efecto de la producción experimental se plantean dos escenarios, en el escenario I las etapas consideradas son: (a) transporte, (b) recolección de zeolita, (c) trituración, (d) molienda, (e) mezclado, (f) curado y (g) experimentación (f) ensayo de compresión. En el escenario II no se incluye la etapa de experimentación; se presume que el escenario II representa un caso más cercano a la producción industrial.

La información utilizada fue recolectada entre mayo del 2015 a enero del 2016 en Ecuador. Como parte del sistema, se

incluyen materiales, agua y energía utilizada en las etapas consideradas para cada escenario. Se describen en las Figuras

1 y 2 los límites del sistema, definidos por la línea de segmentos.

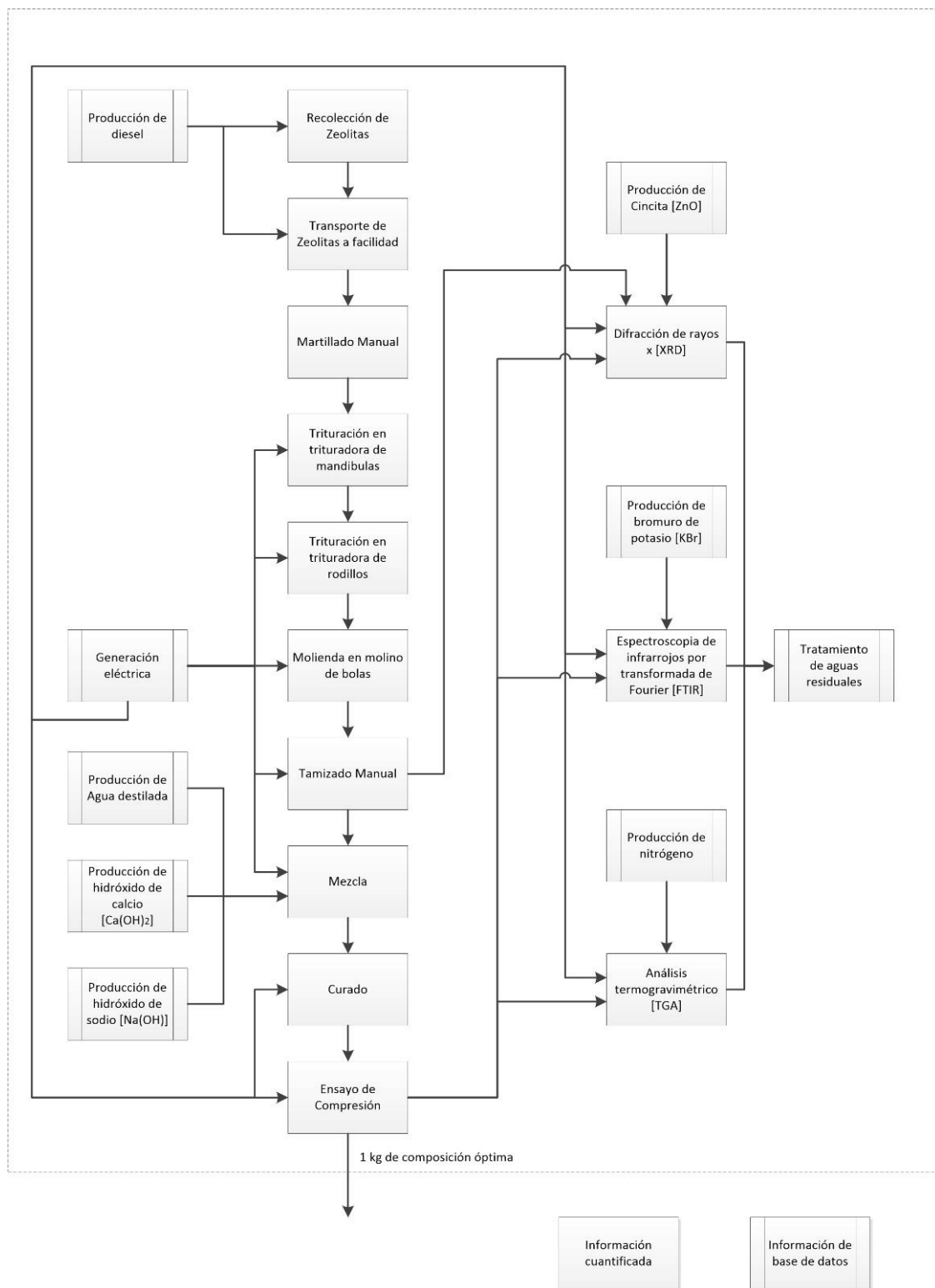


Fig. 1 Ciclo de vida de la producción de 1 kg de composición óptima de geopolímero con experimentación (COCE).

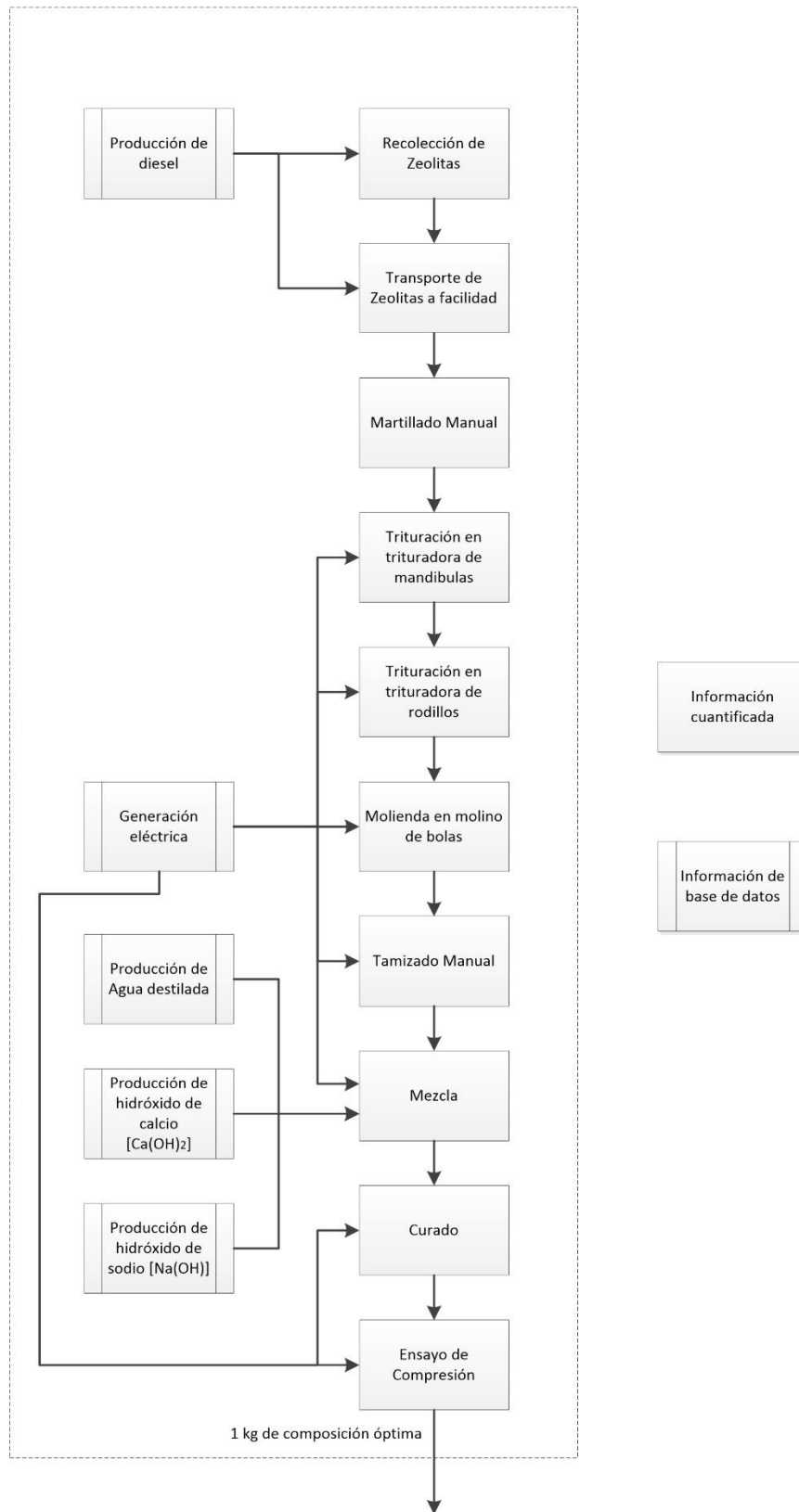


Fig. 2 Ciclo de vida de la producción de 1 kg de composición óptima de geopolímero sin experimentación (COSE).

Con respecto al escenario I, los insumos requeridos en la limpieza y preparación de los utensilios para el proceso de experimentación, son cantidades no estandarizadas, por ende no fue posible cuantificarlos e incluirlos en el inventario. El objetivo de la experimentación, es la caracterización del material; para realizarla se tomaron pequeñas muestras del material, restos del ensayo de compresión, los fungibles utilizados en los procesos y la disposición de los residuos, que fueron considerados al utilizar el software SimaPro versión 8 [11]

B. Inventario

El inventario se preparó de acuerdo al alcance presentado previamente, el análisis fue realizado usando el software SimaPro versión 8 [11]. La información secundaria corresponde a bases de datos, siendo Ecoinvent versión 3 [12] y Electricity Ecuador [13] las principales.

La información primaria para el inventario corresponde a datos sobre los flujos de insumos y productos en cada uno de los procesos para la obtención del geopolímero; que incluyen consumos de energía, materia prima y emisiones.

El consumo de energía eléctrica se determinó en base a los datos de potencia de los equipos usados para los procesos de trituración, molienda, mezcla, curado y experimentación, y de la medición del tiempo de operación.

La composición de los geopolímeros y fungibles, así como la distancias recorridas para la recolección y transporte de la materia prima, fueron proporcionados por los investigadores que condujeron el experimento.

C. Evaluación de Impacto

Se utilizó la metodología CML-IA (baseline) [14]. Se seleccionaron como categorías de impacto: (1) cambio climático (GWP), (2) agotamiento de recursos abióticos (ADP), (3) agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF), (4) agotamiento de capa de ozono (ODP), (5) formación de oxidantes fotoquímicos (POCP), (6) acidificación (AP) y (7) eutrofización (EP). Estas categorías fueron seleccionadas debido a que constituyen una base adecuada para describir el desempeño ambiental de productos industriales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ACV realizado se presentan dos escenarios para el estudio de los posibles impactos en el proceso de producción del geopolímero: I) 1 kg de composición óptima con experimentación (COCE) y, II) composición óptima sin experimentación (COSE); cuyos indicadores se presentan en la Tabla I.

Para el caso de un 1 kg de COCE se presentan los principales procesos que contribuyen a los indicadores de categoría de impacto seleccionados (Fig. 3).

En la Fig. 3 se evidencia que el proceso de mayor contribución a los indicadores agotamiento de recursos

abióticos (ADP) y agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF) es el curado, debido a la cantidad de energía que se utiliza en esta etapa del proceso de producción; esto está relacionado a la carga ambiental asociada a la electricidad utilizada en el proceso. La base de datos Electricity Ecuador corresponde al año 2012 [13], en el que las centrales termoeléctricas tuvieron un aporte importante (36%) a la generación eléctrica total en el Ecuador. Se prevé que para el año 2017 esté en funcionamiento la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair de 1500 MW, así como otros proyectos hidroeléctricos [15], cambiando la proporción de fuentes de generación eléctrica, por ende los resultados actuales de agotamiento de recursos tendrían que actualizarse. Para el resto de categorías de impacto la contribución se divide similarmente entre el proceso de curado y la experimentación, excepto para el indicador eutrofización (EP), donde la mayor contribución corresponde a la experimentación.

TABLA I
CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL SELECCIONADAS Y SUS RESPECTIVAS UNIDADES

| Indicador | Unidad |
|---|---------------------------------|
| Agotamiento de recursos abióticos (ADP) | kg Sb eq / (UF) |
| Agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF) | MJ / (UF) |
| Cambio climático (GWP) | kg CO2 eq / (UF) |
| Agotamiento de capa de ozono (ODP) | kg CFC-11 eq / (UF) |
| Formación de oxidantes fotoquímicos (POCP) | kg C2H4 eq / (UF) |
| Acidificación (AP) | kg SO2 eq / (UF) |
| Eutrofización (EP) | kg PO4 ⁻⁻⁻ eq / (UF) |

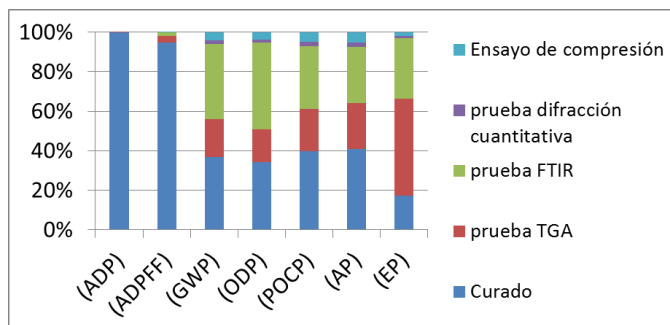


Fig. 3 Aporte de cada proceso en las categorías de impacto, escenario I.

Así mismo para un 1 kg de COSE se presentan los principales procesos que generan los indicadores seleccionados en la Fig. 4. Se observa que los resultados para el escenario II son semejantes a los obtenidos en el escenario I con respecto al agotamiento de recursos, la contribución es principalmente del proceso de curado. En el resto de categorías un porcentaje cercano al 10% corresponde al

ensayo de compresión, por lo que en este escenario, el proceso de curado es crítico respecto al impacto de ambiental.

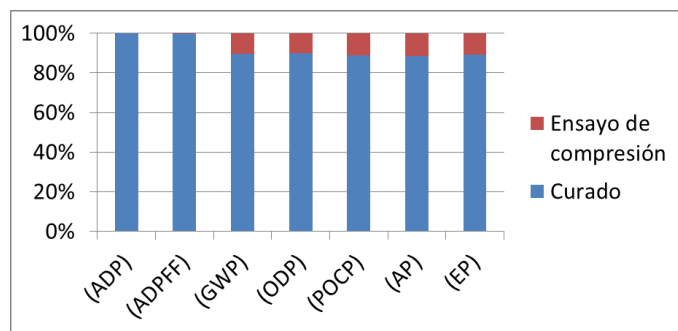


Fig. 4 Aporte de cada proceso en las categorías de impacto, escenario II.

En la Fig. 5 se presenta una comparación de los dos escenarios evaluados: 1 kg de COSE y 1 kg de COCE.

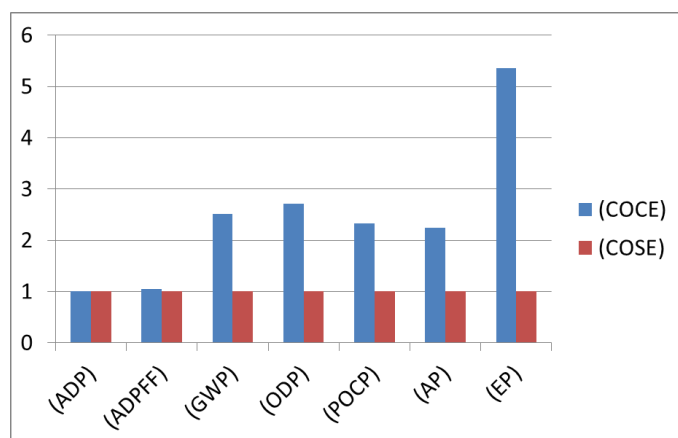


Fig. 5 Comparación entre el caso I & II.

Se puede apreciar en la Fig. 5 que el escenario II supera al escenario I en 5 de las 7 categorías de impacto analizadas, y respecto a las categorías ADP y ADPFF son similares.

El escenario I tiene una carga ambiental con respecto al escenario II menor al 50% para las categorías ADPFF, GWP, ODP, POCP y AP; y para la categoría eutrofización (EP) es 5 veces menos que el escenario II. Esto debido a la carga ambiental asociada a la experimentación; a escala industrial esto no sucedería.

El escenario II es un modelo más cercano a lo que podría pasar industrialmente, ya que en este se ignoran los efectos de la experimentación. En la industria el volumen de producción es tal, que los efectos de la experimentación no son significativos. Por la misma razón la carga ambiental correspondiente al ensayo de compresión se reduciría. En este estudio se incluyó en ambos escenarios, porque era necesario identificar la resistencia a la compresión del material, para que tenga validez 1 kg de composición óptima como UF.

Sin embargo, para el caso II, los indicadores siguen muy elevados respecto a los de la producción de CPO. Por ejemplo en la categoría calentamiento global (GWP), la producción de

1 kg de composición óptima de zeolita sin experimentación es hasta 10 veces mayor en comparación a la producción de 1 kg de CPO [1] [16] [17] [18]; lo cual se explica debido a que se tomó la potencia nominal de los equipos y los tiempos de utilización, para calcular el consumo energético. Industrialmente la eficiencia del proceso productivo es mayor que para el caso analizado, lo que consecuentemente contribuirá a disminuir el impacto ambiental.

Mediante el criterio de potencia nominal y tiempos de utilización, se calculó la energía utilizada en el proceso del curado; pero a escala industrial sería aconsejable utilizar hornos de combustión por los costos de operación. De ser el caso, el cálculo de consumo energético estaría ligado a las propiedades térmicas del material.

Por otro lado, desde el punto de vista de impacto ambiental, se debería analizar si es más eficiente utilizar energía fósil y convertirla en energía térmica, o utilizar electricidad de la red y convertirla en energía térmica, sujeto a la generación y transmisión de la red de energía eléctrica del país en que se desarrolle la producción.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto al impacto ambiental a escala industrial en la producción de alternativas del CPO, este estudio constituye una base para realizar un análisis más detallado; donde se incluyan el modelaje del sistema de producto a escala de producción industrial. Para esto se requiere determinar las propiedades térmicas de este geopolímero, para así calcular el consumo energético real en el proceso de curado. Además debería de realizarse un escalado en todos los procesos, para llegar a un resultado que permita comparar el desempeño de esta alternativa con respecto a la producción convencional de CPO.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y al Laboratorio de Mecánica de Suelos, Rocas y Materiales, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL, por información proporcionada.

VI. REFERENCIAS

- [1] D. A. Salas, A. D. Ramirez, C. R. Rodríguez, D. M. Petroche, A. J. Boero, y J. Duque-Rivera, «Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review», *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 114-122, feb. 2016.
- [2] R. A. Betts, M. Collins, D. L. Hemming, C. D. Jones, J. A. Lowe, y M. G. Sanderson, «When could global warming reach 4 degrees C?», *Philos. Trans. R. Soc.* -

- Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, n.º 1934, pp. 67-84, ene. 2011.
- [3] C. Huntingford, J. A. Lowe, L. K. Gohar, N. H. A. Bowerman, M. R. Allen, S. C. B. Raper, y S. M. Smith, «The link between a global 2 degrees C warming threshold and emissions in years 2020, 2050 and beyond», *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, n.º 1, p. 014039, mar. 2012.
- [4] H. Baumann y A.-M. Tillman, *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur, 2004.
- [5] D. N. Huntzinger y T. D. Eatmon, «A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies», *J. Clean. Prod.*, vol. 17, n.º 7, pp. 668-675, 2009.
- [6] H. Khoury, Y. Abu Salhah, I. Al Dabsheh, F. Slaty, M. Alshaaer, H. Rahier, M. Esaifan, y J. Wastiels, «Geopolymer Products from Jordan for Sustainability of the Environment», en *Advances in Materials Science for Environmental and Nuclear Technology II*, vol. 227, S. K. Sundaram, K. Fox, T. Ohji, y E. Hoffman, Eds. 2011, pp. 289-300.
- [7] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, y S. K. Bhattacharyya, «Geopolymer concrete: A review of some recent developments», *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78-90, jun. 2015.
- [8] J. L. Provis y J. S. J. VanDeventer, Eds., *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. 2009.
- [9] G. Habert, J. B. d'Espinose de Lacaillerie, y N. Roussel, «An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends», *J. Clean. Prod.*, vol. 19, n.º 11, pp. 1229-1238, jul. 2011.
- [10] M. Weil, K. Dombrowski, y A. Buchwald, «Life-cycle analysis of geopolymers», *Geopolymers Struct. Process. Prop. Ind. Appl.*, pp. 194-210, 2009.
- [11] *SimaPro 8*. PRÉ, 2014.
- [12] *ecoinvent 3*. Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich) and Lausanne (EPF Lausanne), the Paul Scherrer Institute (PSI), the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa), and Agroscope, Institute for Sustainability Sciences. 2013.
- [13] A. Ramírez, B. Rivela, A. Boero, A.-M. Melendres, y S. Espinoza, «Life cycle assessment of Ecuadorian electricity», presentado en CILCA 2015 - VI Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Lima, Perú, 2015.
- [14] *CML-IA baseline version*. Leiden, Holanda: Center of Environmental Science of Leiden University, 2013.
- [15] «Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022», CONELEC, Ecuador, Resumen Ejecutivo, 2013.
- [16] G. H. C. Chen, «Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 5, pp. 478-485, 2010.
- [17] D. García-Gusano, I. Herrera, D. Garraín, Y. Lechón, y H. Cabal, «Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 17, n.º 1, pp. 59-73, ene. 2015.
- [18] W. Shen, L. Cao, Q. Li, W. Zhang, G. Wang, y C. Li, «Quantifying CO2 emissions from China's cement industry», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1004-1012, oct. 2015.

Análisis del Ciclo de Vida de la Producción de Cemento a Base de Zeolitas a Escala de Laboratorio

Miguel Alcivar, Angel D. Ramirez, Ph.D., Mauricio Cornejo, Ph.D., Andrea Boero, M.Sc., Carlos Rodríguez, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, migaalci@espol.edu.ec, aramire@espol.edu.ec,
mcornejo@espol.edu.ec, aboero@espol.edu.ec, crodrigu@espol.edu.ec

Resumen. Este estudio busca servir de base para el desarrollo sostenible en la industria del cemento y la construcción, ambas implican impactos al medio ambiente como consecuencia de la creciente demanda de sus servicios y productos. La preocupación por estos efectos adversos al desarrollo sostenible, lleva a desarrollar tecnologías más eficientes en la industria cementera, pero aún hay muchos problemas y consecuencias latentes; en busca de soluciones, se propone la producción de cemento desde fuentes alternativas de materia prima, en este caso de zeolitas, y medir el impacto que esto conlleva al medio ambiente.

Para realizar esta cuantificación se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Se observa que la carga ambiental de este procedimiento es mayor que la del cemento Portland ordinario (CPO), pero esto se debe a la escala en que se realizó el estudio, y esta podría verse menguada cuando el procedimiento se realice a escala industrial.

Palabras clave-- zeolitas, sostenible, LCA, cemento, construcción.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el calentamiento global es uno de los grandes problemas del planeta, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a las actividades humanas. Se predice que éstas seguirán aumentando con el paso de los años, y que la concentración de CO₂ atmosférico podría superar las 800 ppm a finales del siglo [1] [2] [3].

La industria cementera es intensiva en el consumo de energía, gran parte de esta proviene de combustibles fósiles, esto lleva a relacionarla directamente con las emisiones de GEI; el CPO es uno de los más importantes materiales de construcción, por lo cual, la industria de producción de cemento es un sector con significativas emisiones de GEI [1]. La producción de cemento además tiene otras implicaciones ambientales, por ejemplo ciertas emisiones como NO_x y SO₂, que son precursoras de lluvia ácida, la eutrofización está asociada a estas emisiones de NO_x, y el smog de invierno a las de SO₂, entre otros impactos y consecuencias [1].

El ACV es una herramienta que permite cuantificar los impactos ambientales asociados a la obtención de un producto durante sus diferentes fases de producción. Un ACV implica seguir un producto desde la “cuna”, donde ocurre la extracción de materia prima, su fabricación y uso, hasta su “tumba” (ya sea, disposición final, reciclaje u otro fin). El alcance de un ACV puede modificarse, de tal manera que se siga al proceso solo hasta la “puerta” [4].

El cemento, en particular su producción, ha sido estudiado mediante el enfoque de ACV, identificado diversos efectos adversos al medio ambiente, así como posibles medidas de mitigación [1] [5]. Estas medidas están asociadas a: (1) uso de Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.250>
ISBN: 978-0-9822896-9-3
ISSN: 2414-6390

mezclas alternativas donde se reemplaza hasta 30% del clinker en la mezcla, (2) reciclar polvo de CPO del horno, (3) secuestrar CO₂ en el polvo de CPO del horno [5]. La alternativa de cementos mezclados ha evidenciado mejores resultados, sin embargo se ven menguados debido a la demanda del cemento en la industria de la construcción, debido el volumen de producción es tal, que el impacto ambiental sigue siendo un problema latente [5].

Con el propósito de reducir las emisiones se han planteado soluciones alternativas a las ya propuestas, entre estas, los geopolímeros para suplir algunas aplicaciones del CPO y sus mezclas [6] [7].

Un geopolímero es un material sólido que se obtiene al combinar polvo de aluminosilicatos reactivos con una solución alcalina, que después pasa por un proceso de curado de su fase de gel [8, pp. 1-5].

Estudios de geopolímeros los presentan como alternativa al CPO y sus presentaciones como mezclas [6] [7]. Por lo que desde el punto de vista técnico puede ser factible. No obstante, se han realizados pocos estudios acerca del impacto ambiental de su producción, incluso hay evidencia de que puede ser similar al de la producción de CPO y sus mezclas [9]. De igual manera dependiendo de la composición de la materia prima y activadores para producir geopolímeros, se podría encontrar alguna mezcla que reduzca potencialmente los efectos adversos al medio ambiente [10].

El objetivo de este estudio es determinar el desempeño ambiental de la producción a escala de laboratorio, de geopolímeros a partir de zeolitas extraídas de la Cordillera Chongón-Colonche, en Ecuador. Para esto se utilizará la metodología de ACV. Se prevé que los resultados podrán ser utilizados como base al establecimiento de criterios de sostenibilidad en construcción.

II. METODOLOGÍA

A. Definición del alcance

Se define 1 kg de composición óptima del geopolímero, como unidad funcional (UF). Para estudiar el efecto de la producción experimental se plantean dos escenarios, en el escenario I las etapas consideradas son: (a) transporte, (b) recolección de zeolita, (c) trituración, (d) molienda, (e) mezclado, (f) curado y (g) experimentación (f) ensayo de compresión. En el escenario II no se incluye la etapa de experimentación; se presume que el escenario II representa un caso más cercano a la producción industrial.

La información utilizada fue recolectada entre mayo del 2015 a enero del 2016 en Ecuador. Como parte del sistema, se

incluyen materiales, agua y energía utilizada en las etapas consideradas para cada escenario. Se describen en las Figuras 1 y 2 los límites del sistema, definidos por la línea de segmentos.

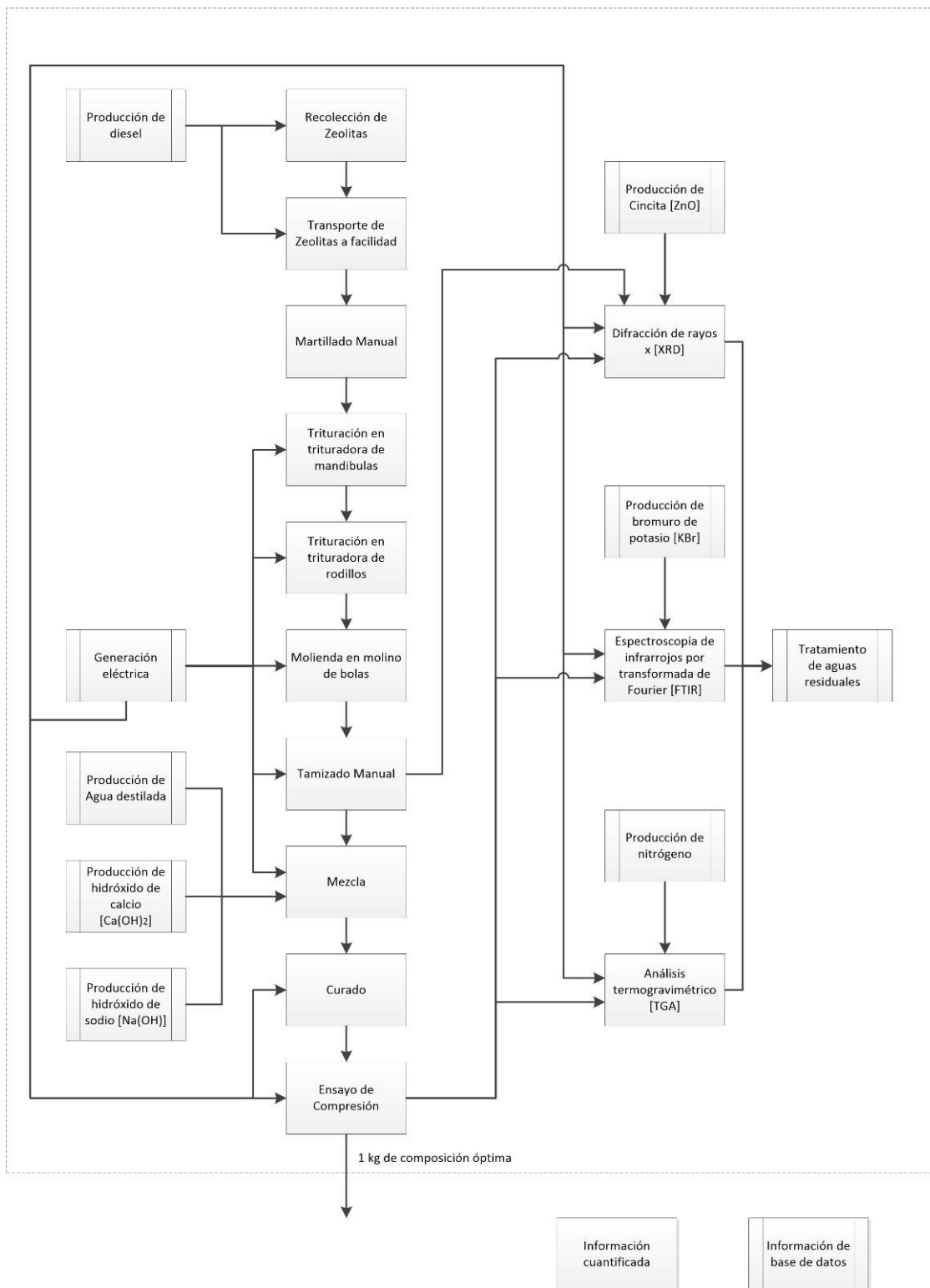


Fig. 1 Ciclo de vida de la producción de 1 kg de composición óptima de geopolímero con experimentación (COCE).

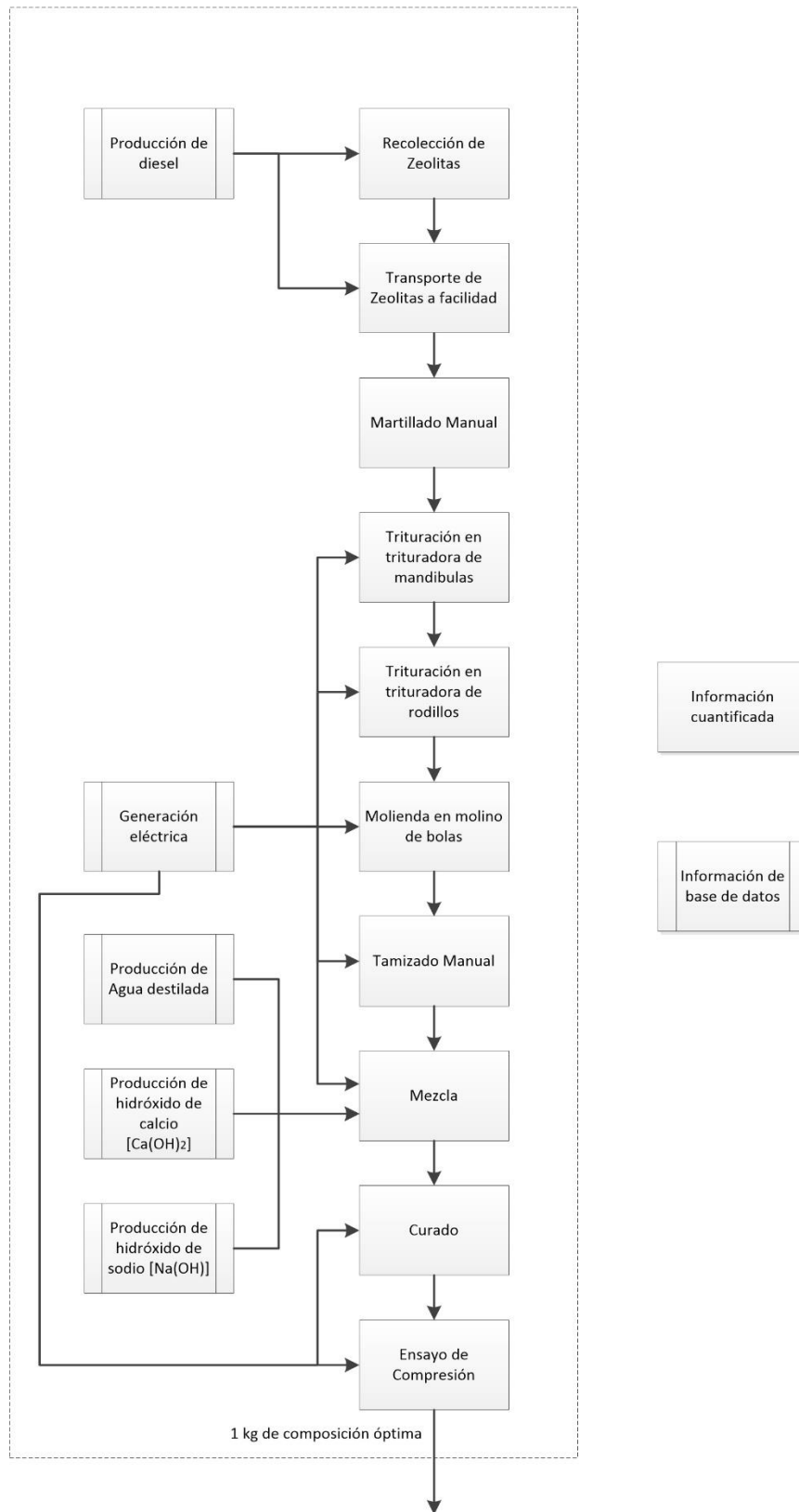


Fig. 2 Ciclo de vida de la producción de 1 kg de composición óptima de geopolímero sin experimentación (COSE).

Con respecto al escenario I, los insumos requeridos en la limpieza y preparación de los utensilios para el proceso de experimentación, son cantidades no estandarizadas, por ende no fue posible cuantificarlos e incluirlos en el inventario. El objetivo de la experimentación, es la caracterización del material; para realizarla se tomaron pequeñas muestras del material, restos del ensayo de compresión, los fungibles utilizados en los procesos y la disposición de los residuos, que fueron considerados al utilizar el software SimaPro versión 8 [11]

B. Inventario

El inventario se preparó de acuerdo al alcance presentado previamente, el análisis fue realizado usando el software SimaPro versión 8 [11]. La información secundaria corresponde a bases de datos, siendo Ecoinvent versión 3 [12] y Electricity Ecuador [13] las principales.

La información primaria para el inventario corresponde a datos sobre los flujos de insumos y productos en cada uno de los procesos para la obtención del geopolímero; que incluyen consumos de energía, materia prima y emisiones.

El consumo de energía eléctrica se determinó en base a los datos de potencia de los equipos usados para los procesos de trituración, molienda, mezcla, curado y experimentación, y de la medición del tiempo de operación.

La composición de los geopolímeros y fungibles, así como la distancias recorridas para la recolección y transporte de la materia prima, fueron proporcionados por los investigadores que condujeron el experimento.

C. Evaluación de Impacto

Se utilizó la metodología CML-IA (baseline) [14]. Se seleccionaron como categorías de impacto: (1) cambio climático (GWP), (2) agotamiento de recursos abióticos (ADP), (3) agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF), (4) agotamiento de capa de ozono (ODP), (5) formación de oxidantes fotoquímicos (POCP), (6) acidificación (AP) y (7) eutrofización (EP). Estas categorías fueron seleccionadas debido a que constituyen una base adecuada para describir el desempeño ambiental de productos industriales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ACV realizado se presentan dos escenarios para el estudio de los posibles impactos en el proceso de producción del geopolímero: I) 1 kg de composición óptima con experimentación (COCE) y, II) composición óptima sin experimentación (COSE); cuyos indicadores se presentan en la Tabla I.

Para el caso de un 1 kg de COCE se presentan los principales procesos que contribuyen a los indicadores de categoría de impacto seleccionados (Fig. 3).

En la Fig. 3 se evidencia que el proceso de mayor contribución a los indicadores agotamiento de recursos

abióticos (ADP) y agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF) es el curado, debido a la cantidad de energía que se utiliza en esta etapa del proceso de producción; esto está relacionado a la carga ambiental asociada a la electricidad utilizada en el proceso. La base de datos Electricity Ecuador corresponde al año 2012 [13], en el que las centrales termoeléctricas tuvieron un aporte importante (36%) a la generación eléctrica total en el Ecuador. Se prevé que para el año 2017 esté en funcionamiento la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair de 1500 MW, así como otros proyectos hidroeléctricos [15], cambiando la proporción de fuentes de generación eléctrica, por ende los resultados actuales de agotamiento de recursos tendrían que actualizarse. Para el resto de categorías de impacto la contribución se divide similarmente entre el proceso de curado y la experimentación, excepto para el indicador eutrofización (EP), donde la mayor contribución corresponde a la experimentación.

TABLA I
CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL SELECCIONADAS Y SUS RESPECTIVAS UNIDADES

| Indicador | Unidad |
|---|---------------------|
| Agotamiento de recursos abióticos (ADP) | kg Sb eq / (UF) |
| Agotamiento de combustibles fósiles (ADPFF) | MJ / (UF) |
| Cambio climático (GWP) | kg CO2 eq / (UF) |
| Agotamiento de capa de ozono (ODP) | kg CFC-11 eq / (UF) |
| Formación de oxidantes fotoquímicos (POCP) | kg C2H4 eq / (UF) |
| Acidificación (AP) | kg SO2 eq / (UF) |
| Eutrofización (EP) | kg PO4--- eq / (UF) |

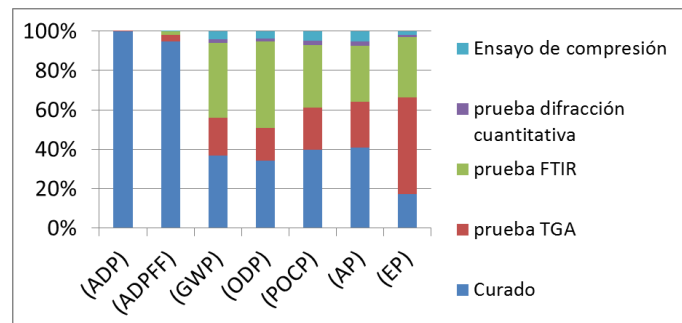


Fig. 3 Aporte de cada proceso en las categorías de impacto, escenario I.

Así mismo para un 1 kg de COSE se presentan los principales procesos que generan los indicadores seleccionados en la Fig. 4. Se observa que los resultados para el escenario II son semejantes a los obtenidos en el escenario I con respecto al agotamiento de recursos, la contribución es principalmente del proceso de curado. En el resto de categorías un porcentaje cercano al 10% corresponde al ensayo de compresión, por lo

que en este escenario, el proceso de curado es crítico respecto al impacto de ambiental.

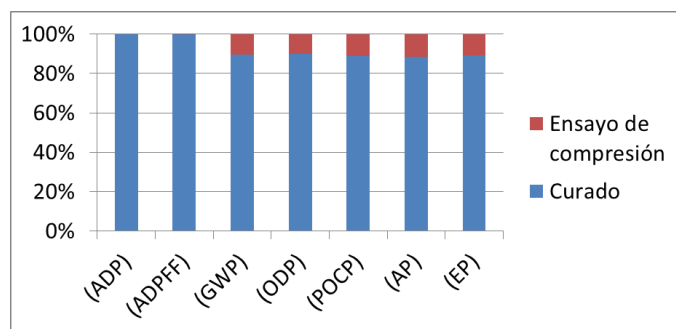


Fig. 4 Aporte de cada proceso en las categorías de impacto, escenario II.

En la Fig. 5 se presenta una comparación de los dos escenarios evaluados: 1 kg de COSE y 1 kg de COCE.

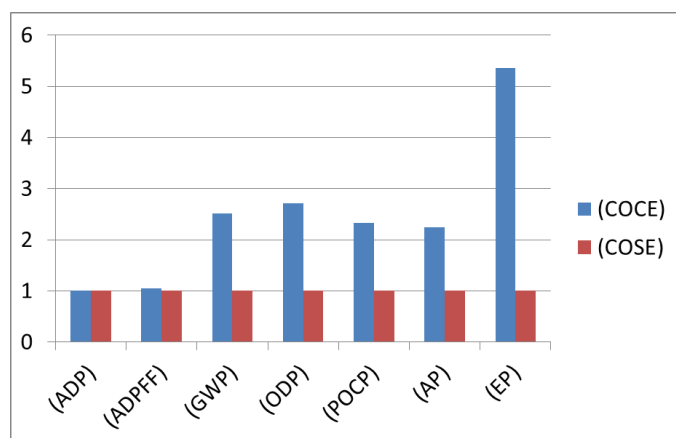


Fig. 5 Comparación entre el caso I & II.

Se puede apreciar en la Fig. 5 que el escenario II supera al escenario I en 5 de las 7 categorías de impacto analizadas, y respecto a las categorías ADP y ADPFF son similares.

El escenario I tiene una carga ambiental con respecto al escenario II menor al 50% para las categorías ADPFF, GWP, ODP, POCP y AP; y para la categoría eutrofización (EP) es 5 veces menos que el escenario II. Esto debido a la carga ambiental asociada a la experimentación; a escala industrial esto no sucedería.

El escenario II es un modelo más cercano a lo que podría pasar industrialmente, ya que en este se ignoran los efectos de la experimentación. En la industria el volumen de producción es tal, que los efectos de la experimentación no son significativos. Por la misma razón la carga ambiental correspondiente al ensayo de compresión se reduciría. En este estudio se incluyó en ambos escenarios, porque era necesario identificar la resistencia a la compresión del material, para que tenga validez 1 kg de composición óptima como UF.

Sin embargo, para el caso II, los indicadores siguen muy elevados respecto a los de la producción de CPO. Por ejemplo en la categoría calentamiento global (GWP), la producción de

1 kg de composición óptima de zeolita sin experimentación es hasta 10 veces mayor en comparación a la producción de 1 kg de CPO [1] [16] [17] [18]; lo cual se explica debido a que se tomó la potencia nominal de los equipos y los tiempos de utilización, para calcular el consumo energético. Industrialmente la eficiencia del proceso productivo es mayor que para el caso analizado, lo que consecuentemente contribuirá a disminuir el impacto ambiental.

Mediante el criterio de potencia nominal y tiempos de utilización, se calculó la energía utilizada en el proceso del curado; pero a escala industrial sería aconsejable utilizar hornos de combustión por los costos de operación. De ser el caso, el cálculo de consumo energético estaría ligado a las propiedades térmicas del material.

Por otro lado, desde el punto de vista de impacto ambiental, se debería analizar si es más eficiente utilizar energía fósil y convertirla en energía térmica, o utilizar electricidad de la red y convertirla en energía térmica, sujeto a la generación y transmisión de la red de energía eléctrica del país en que se desarrolle la producción.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto al impacto ambiental a escala industrial en la producción de alternativas del CPO, este estudio constituye una base para realizar un análisis más detallado; donde se incluyan el modelaje del sistema de producto a escala de producción industrial. Para esto se requiere determinar las propiedades térmicas de este geopolímero, para así calcular el consumo energético real en el proceso de curado. Además debería de realizarse un escalado en todos los procesos, para llegar a un resultado que permita comparar el desempeño de esta alternativa con respecto a la producción convencional de CPO.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y al Laboratorio de Mecánica de Suelos, Rocas y Materiales, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL, por información proporcionada.

VI. REFERENCIAS

- [1] D. A. Salas, A. D. Ramirez, C. R. Rodríguez, D. M. Petroche, A. J. Boero, y J. Duque-Rivera, «Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review», *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 114-122, feb. 2016.
- [2] R. A. Betts, M. Collins, D. L. Hemming, C. D. Jones, J. A. Lowe, y M. G. Sanderson, «When could global warming reach 4 degrees C?», *Philos. Trans. R. Soc. - Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, n.º 1934, pp. 67-84, ene. 2011.

- [3] C. Huntingford, J. A. Lowe, L. K. Gohar, N. H. A. Bowerman, M. R. Allen, S. C. B. Raper, y S. M. Smith, «The link between a global 2 degrees C warming threshold and emissions in years 2020, 2050 and beyond», *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, n.º 1, p. 014039, mar. 2012.
- [4] H. Baumann y A.-M. Tillman, *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur, 2004.
- [5] D. N. Huntzinger y T. D. Eatmon, «A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies», *J. Clean. Prod.*, vol. 17, n.º 7, pp. 668-675, 2009.
- [6] H. Khoury, Y. Abu Salhah, I. Al Dabsheh, F. Slaty, M. Alshaaer, H. Rahier, M. Esaifan, y J. Wastiels, «Geopolymer Products from Jordan for Sustainability of the Environment», en *Advances in Materials Science for Environmental and Nuclear Technology II*, vol. 227, S. K. Sundaram, K. Fox, T. Ohji, y E. Hoffman, Eds. 2011, pp. 289-300.
- [7] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, y S. K. Bhattacharyya, «Geopolymer concrete: A review of some recent developments», *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78-90, jun. 2015.
- [8] J. L. Provis y J. S. J. VanDeventer, Eds., *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. 2009.
- [9] G. Habert, J. B. d'Espinose de Lacaillerie, y N. Roussel, «An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends», *J. Clean. Prod.*, vol. 19, n.º 11, pp. 1229-1238, jul. 2011.
- [10] M. Weil, K. Dombrowski, y A. Buchwald, «Life-cycle analysis of geopolymers», *Geopolymers Struct. Process. Prop. Ind. Appl.*, pp. 194-210, 2009.
- [11] *SimaPro 8*. PRé, 2014.
- [12] *ecoinvent 3*. Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich) and Lausanne (EPF Lausanne), the Paul Scherrer Institute (PSI), the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa), and Agroscope, Institute for Sustainability Sciences. 2013.
- [13] A. Ramírez, B. Rivela, A. Boero, A.-M. Melendres, y S. Espinoza, «Life cycle assessment of Ecuadorian electricity», presentado en CILCA 2015 - VI Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Lima, Perú, 2015.
- [14] *CML-IA baseline version*. Leiden, Holanda: Center of Environmental Science of Leiden University, 2013.
- [15] «Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022», CONELEC, Ecuador, Resumen Ejecutivo, 2013.
- [16] G. H. C. Chen, «Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 5, pp. 478-485, 2010.
- [17] D. García-Gusano, I. Herrera, D. Garraín, Y. Lechón, y H. Cabal, «Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 17, n.º 1, pp. 59-73, ene. 2015.
- [18] W. Shen, L. Cao, Q. Li, W. Zhang, G. Wang, y C. Li, «Quantifying CO2 emissions from China's cement industry», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1004-1012, oct. 2015.