


Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador

Embodied energy and CO₂ emissions in the cement manufacturing process in Ecuador

Ana León-Velez 

Vanessa Guillén-Mena 

Resumen

El cemento es un material indispensable para la construcción, por eso, obtener datos locales sobre el impacto ambiental que genera su producción en Ecuador es necesario para los tomadores de decisiones y fabricantes. Esta investigación determina la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento a partir de la aplicación de las metodologías del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y de las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. El estudio considera la producción de una tonelada de cemento en un año de producción con un enfoque de “puerta a puerta”. Los resultados muestran que esa producción requiere 3.191,95MJ de energía y genera emisiones de 510,57kgCO₂. Las contribuciones dominantes en energía se deben al consumo de caliza, *fuel oil* y electricidad. El proceso unitario que genera mayor impacto es la producción del clínker, tanto por las reacciones químicas que se producen en el horno como por su consumo de combustible.

Palabras clave: Producción del cemento. Producción de clínker. Energía contenida. Emisiones de CO₂. Ecuador.

Abstract

Cement is an indispensable material for construction, so obtaining local data on the environmental impact generated by its production in Ecuador is necessary for decision makers and manufacturers. This research determines the embodied energy and CO₂ emissions in the cement manufacturing process, through the application of the Life Cycle Analysis Methodology and the Guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2006 for national inventories of greenhouse gases. The study considers the production of 1 tonne of cement per year of production with a "gate to gate" approach. The results show that its production requires 3,191.95 MJ of energy and generates emissions of 510.57 KgCO₂. The main contributors in energy are due to the limestone, fuel oil and electricity. The unitary process that generates the greatest impact is the clinker production, both from the chemical reactions occurring in the kiln and by its fossil fuel consumption.

¹Ana León-Velez

¹Universidad de Cuenca
Cuenca - Ecuador

²Vanessa Guillén-Mena

²Universidad de Cuenca
Cuenca - Ecuador

Recebido em 02/04/19

Aceito em 05/08/19

Keywords: Cement production. Clinker production, embodied energy, CO₂ emissions, Ecuador.

Introducción

El cambio climático ha provocado un impacto a escala mundial, ya que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado desde la era preindustrial, alcanzando las mayores concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Es probable que los efectos de estas emisiones sean la causa del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX (GRUPO..., 2014).

A nivel global, la industria de la construcción representa el 40% del consumo de energía primaria, el 33% de las emisiones de CO₂ y el 60% de la materia prima extraída de la litósfera (ZABALZA; VALERO; ARANDA, 2011; ZHANG; CHENG; LO, 2014), siendo la actividad que genera el mayor consumo de recursos naturales (HOSSAIN *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2018; MERCADER; RAMÍREZ DE ARELLANO; OLIVARES, 2012; ZHANG; WANG, 2016). El panorama presentado muestra el gran potencial que tiene el sector para buscar soluciones que minimicen los impactos generados por su actividad (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018).

La industria de producción de cemento es uno de los mayores sectores industriales emisores de CO₂ (MIKULČIĆ *et al.*, 2016), responsable del 5% al 8% de las emisiones mundiales (MORETTI; CARO, 2017; SALAS *et al.*, 2016). La producción de cemento ha aumentado de 2,1 billones de toneladas en el año 2004 a 4,65 billones de toneladas en el año 2016 (CHEN *et al.*, 2016; THE EUROPEAN..., 2018). En su fabricación, aproximadamente la mitad de las emisiones de CO₂ provienen de la combustión de fósiles, mientras que el resto es emitido por la calcinación de piedra caliza (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Las emisiones también dependen de características de la producción, comoubicación geográfica, tecnología, eficiencia de producción, selección de combustibles para el horno y combinación de fuentes de energía utilizadas en la generación de electricidad (PETEK GURSEL *et al.*, 2014).

Según las cifras del Informe International Cement Review (FEDERACIÓN..., 2018), la producción de cemento en América Latina y el Caribe fue estimada en 4,2% de la producción mundial (año 2016). Además, el valor estimado del consumo *per cápita* para la región fue de 283kg/hab, y las emisiones de CO₂ fueron de 580kgCO₂/t de producto cementante, valor inferior al presentado a nivel mundial (616kgCO₂/t). El Cement Review también indica que el consumo *per cápita* en Ecuador en el mismo año fue de 331kg/hab, lo cual lo incluyó en el grupo de los países con mayor consumo de cemento por habitante.

Conforme el Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón (2018), en el año 2015, la comercialización del cemento gris a nivel nacional se encontraba representada principalmente por tres empresas: 58,73% correspondía a empresa Holcim, 23,61%, a la empresa UNACEM (Unión Andina de Cemento) y 17,66%, a la empresa UCEM (Unión Cementera Nacional), una fusión de las compañías Industrias Guapán S.A. y Cementos Chimborazo C.A. Las tres empresas cuentan con cinco plantas cementeras distribuidas en las ciudades ecuatorianas de Guayaquil, Latacunga, Otavalo, Riobamba y Azogues. Se alimentan principalmente de energía eléctrica y térmica, sin embargo, para reducir el consumo de combustibles fósiles (*fuel oil, bunker, pet coke*, entre otros), algunas plantas utilizan combustibles alternativos (derivados de desechos peligrosos, aceites usados, palma africana y cascarilla de arroz). Dependiendo de la empresa, el porcentaje de reemplazo varía entre de 5 a 30% (GUAPAN, 2017; HOLCIM..., 2017; UNIÓN..., 2018).

En Ecuador la fabricación de cementos hidráulicos compuestos se basa en la norma NTE INEN 490 (NORMA..., 2011) y en su equivalente, la norma ASTM C 595, que se emplean en aplicaciones generales y especiales. Otra norma relacionada con el cemento hidráulico es la norma NTE INEN 2380 (NORMA..., 2011), que es equivalente a la norma C 1157.

Con el objetivo de proporcionar datos locales que permitan que los tomadores de decisiones busquen caminos para minimizar los impactos asociados a la producción del cemento, el presente estudio busca determinar el consumo energético y las emisiones de CO₂ al ambiente en cada proceso unitario al dividir la producción en dos subsistemas: producción de clínker y producción de cemento.

Estudios sobre el cemento

Se han realizado estudios a nivel mundial para cuantificar el consumo de energía y las emisiones de CO₂ aportados a la atmósfera en el proceso de fabricación del cemento, por medio de la aplicación de la metodología del ACV (HOSSAIN *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2014; MORETTI; CARO, 2017; SONG *et al.*, 2016). El ACV permite evaluar la carga ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de su ciclo de vida con base en los lineamientos de normas NTE INEN-ISO 14040 (NORMAL..., 2000) y NTE INEN-

ISO 14044 (NORMA..., 2014), que comprenden cuatro fases: definición de objetivos y alcance, desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto del ciclo de vida e interpretación.

Uno de los mayores problemas de los ACV suele estar en el inventario, pues requiere largos y costosos procesos de recopilación de datos y, a excepción de los países europeos y de Estados Unidos, el resto del mundo no cuenta con inventarios completos y fiables. Esta situación ha generado que se opte por tomar datos de inventarios de ciclo de vida extranjeros, sin embargo, al no ser usados adecuadamente pueden conducir a errores significativos o generarse discrepancias que generalmente se deben a la tecnología y a la fuente de energía utilizada (LU; LE; SONG, 2017). Por otro lado, es posible realizar una simplificación para reducir la complejidad de los estudios, que consiste en limitar el número de categorías de impacto ambiental, sin afectar el resultado siguiendo la norma UNE 150041 EX (ASOCIACIÓN..., 1998).

Las principales categorías de impacto contempladas por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC (IHOBE, 2009)) son: calentamiento global, consumo de recursos energéticos, reducción de la capa de ozono, eutrofización, acidificación, consumo de materias primas y formación de oxidantes fotoquímicos. Su selección depende de los resultados que se deseen obtener, y para cuantificarlos se requiere la recopilación de datos de entradas y salidas, que se conocen como *inputs/outputs*, desarrolladas en la etapa del ICV.

Resultados de varios estudios sobre la producción de cemento indican que, de las siete categorías de impacto, la de “calentamiento global” (o sea, la que mide las emisiones de CO₂ equivalentes emitidas a la atmósfera) es la más representativa (MORETTI; CARO, 2017; SUMMERBELL; BARLOW; CULLEN, 2016). Por otra parte, también se evidencia que la estructuración del ICV se realiza en dos subsistemas, la producción del clínker y la producción del cemento, ya que reduce la dificultad de visualizar los flujos de energía y materiales en los procesos intermedios y permite analizar detalladamente los procesos por separado (CARDIM DE CARVALHO FILHO, 2001; JOSA *et al.*, 2004; MORETTI; CARO, 2017).

Otros resultados de investigaciones sobre la producción del cemento también han determinado que el proceso de calcinación es el mayor contribuyente de emisiones ambientales y que debe ser considerado el punto de control para conseguir ahorrar energía y, en consecuencia, reducir emisiones. Para ello, algunas opciones son el uso de tecnologías avanzadas, como la recuperación de calor y cogeneración, y la sustitución de combustibles fósiles por alternativas que disminuyan el impacto, como desechos agrícolas (paja de maíz), desechos de biomasa, fibras de palma, neumáticos, etc. Para controlar el consumo de materias primas, estas pueden ser sustituidas por subproductos industriales – como escoria, ceniza volante, yeso y arena industrial – o por la mezcla de piedra caliza con vidrio de desecho, entre otros (HOSSAIN *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2016; STAFFORD *et al.*, 2016). La utilización de estos componentes minerales también conlleva a una reducción equivalente de las emisiones directas de CO₂ asociadas a la producción de clínker, tanto por calcinación como por combustión (CEMENT..., 2011).

Cuantificación de las emisiones de CO₂

Para determinar la huella de carbono en la producción de cemento, existen varias metodologías que pueden ser utilizadas. Sin embargo, su elección dependerá del objetivo y de la localidad del estudio. Algunas regiones y países cuentan con sus propios planteamientos o normas; un ejemplo de ello es Estados Unidos, que cuenta con una iniciativa del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (CEMEX..., 2011; WORLD..., 2006), o la Unión Europea, que cuenta con el Reglamento (UE) n° 601 de la Comisión (COMISIÓN..., 2012).

En el caso de Ecuador para estimar las emisiones de CO₂, se evidencia el uso de la metodología establecida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), denominada “Directrices del 2006 IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero” (SALAS *et al.*, 2015; MINISTERIO..., 2017). Esta metodología es parte de un acuerdo internacional relacionado con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Dentro de estas directrices se abordan las categorías “energía”, “procesos industriales” y “uso de productos” (RYPDAL *et al.*, 2006).

Materiales y métodos

El enfoque de la investigación es cuantitativa, no experimental y tiene como objetivo aportar datos sobre el desempeño ambiental en dos categorías de impacto correspondientes al consumo de recursos energéticos y al calentamiento global (CO₂) del proceso de fabricación del cemento gris, en el que se considera la tecnología empleada en una planta cementera de Ecuador. Para la cuantificación de los datos, se aplican las

metodologías de ACV simplificado y del IPCC. Con relación a la metodología del ACV, las tres primeras etapas se desarrollan a continuación, mientras que la interpretación corresponde al apartado de discusión.

En las Directrices del IPCC, las estimaciones de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero se dividen en sectores principales, entre ellos Energía, y Procesos Industriales y Uso del Producto. Para el sector Energía la determinación de emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles se obtiene a partir de factores de emisión porque, al ser independiente de la tecnología, son aplicables a los procesos de combustión estacionaria y móvil, situación que no ocurre con las emisiones de CH₄ y N₂O. Para su cuantificación se considera la metodología del Nivel 1, que es una estimación que demanda conocer las cantidades de combustible quemado y el factor de emisión por defecto (GÓMEZ *et al.*, 2006). Por su parte, para los sectores Procesos Industriales y Uso del Producto, que abordan las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por los procesos industriales, las principales fuentes de emisión son las descargas que transforman materias por medios químicos o físicos, como la industria del cemento, que libera cantidades significativas de CO₂ en el proceso de calcinación de materiales carbonatados (HANLE *et al.*, 2006). Para estimar las emisiones de CO₂ en el proceso industrial, se considera la metodología del Nivel 2, el cual está en función de los datos de producción de clínker y de un factor de emisión por defecto. En la fabricación del cemento, además de generarse CO₂ durante la producción del clínker, se genera polvo de horno de cemento denominado CKD por la sigla de “*cement kiln dust*” (HANLE *et al.*, 2006).

Caso de estudio

El análisis se realiza en una planta cementera de Ecuador, en la cual se produce cemento portland puzolánico tipo IP vía seca, que mantiene la certificación de conformidad a la Norma NTE INEN 490 (NORMA..., 2011), equivalente a la norma ASTM 595, y se clasifica como cemento hidráulico para uso en hormigón para construcción en general.

Definición de objetivo y alcance

El objetivo del análisis es determinar la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento. El límite del sistema empleado es de “puerta a puerta”, que abarca el proceso de producción dentro de la fábrica. La investigación no considera los impactos de transporte de la materia prima en la etapa de extracción debido a la falta de disponibilidad de ciertos datos.

La unidad declarada de este estudio es de una tonelada de cemento (SALAS *et al.*, 2015). En la categoría de impacto ambiental “consumo de recursos energéticos”, la unidad de referencia es MJ (IHOBE, 2009), por lo tanto, su unidad se expresa como MJ/t. En el caso de las emisiones de CO₂ que están dentro de la categoría “calentamiento global”, la unidad de referencia es kilos de CO₂ por tonelada.

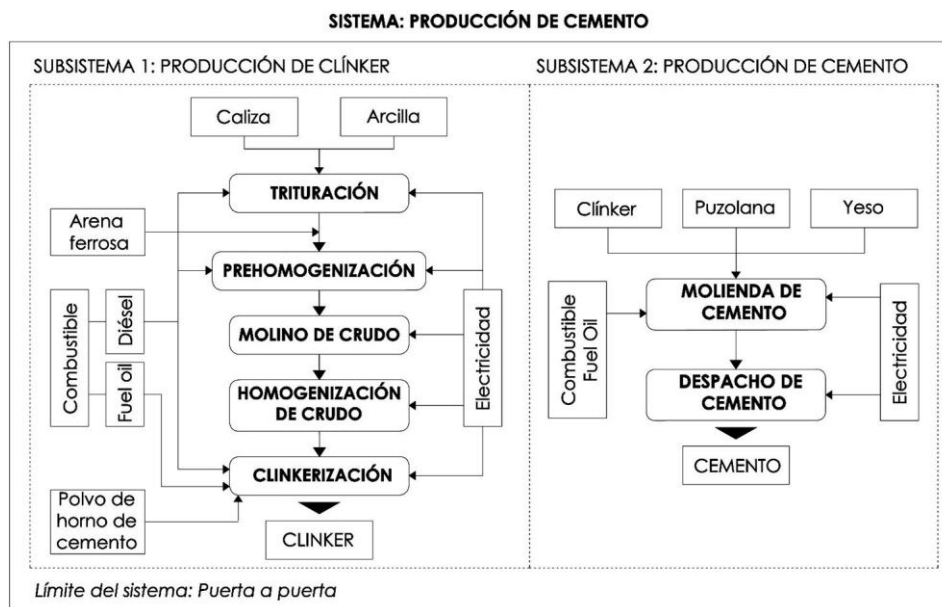
La Figura 1 presenta el diagrama de flujo del proceso de producción del cemento, que se divide en dos subsistemas – producción de clínker y producción de cemento –, en los cuales se especifican los datos de entradas y salidas del sistema. Es importante indicar que en todos los procesos unitarios se generan emisiones de CO₂.

Desarrollo del inventario de ciclo de vida

Se recopilaron reportes mensuales de producción de la planta cementera, a partir de los cuales se han cuantificado los datos de entrada y salida de cada uno de los procesos unitarios durante un año de producción (año 2016). Debido a cuestiones de confidencialidad, algunos datos no pueden ser revelados directamente. Las fichas del inventario se rellenaron con base en el modelo de hoja de datos de procesos unitarios de la Norma NTE INEN-ISO 14044 (NORMA..., 2014) y en el modelo de fichas de los inventarios de Simapro (CARDIM DE CARVALHO FILHO, 2001). Es importante destacar que, en Ecuador, la matriz de generación eléctrica al año 2016 estuvo conformada por un 58,08% de hidroeléctricas, un 39,49% de centrales térmicas y un 2,43% de otras fuentes de energía renovable (AGENCIA..., 2017).

A continuación, la estructuración de los datos se subdivide en los subtítulos producción de clínker y producción de cemento.

Figura 1 - Diagrama de flujo del proceso de producción del cemento en el límite del sistema “puerta a puerta”



Producción de clinker

Durante el proceso de producción de clinker, se calcina la piedra caliza (compuesta esencialmente por carbonato de calcio [CaCO_3]), arcilla y arena para producir silicatos de calcio. Como consecuencia de este proceso, se libera CO_2 (HANLE *et al.*, 2006). Los procesos que intervienen en la producción de clinker son los cinco presentados a continuación:

- trituración: fragmentación de rocas calizas y de arcilla en el triturador primario;
- prehomogenización: proceso semiautomático que apila la caliza triturada para luego transportarla hasta las tolvas de dosificación del molino de crudo;
- molino de crudo: la caliza obtenida se dosifica con calizas de alta pureza, arcilla y arena ferrosa. El molino es un circuito cerrado y llega a una temperatura de $320\text{ }^\circ\text{C}$ para secar la caliza;
- homogenización del crudo: se mezcla la harina cruda hasta obtener un material homogéneo para lo cual se utiliza aire comprimido. El sistema de homogenización consiste en dos silos, uno para la recepción del producto de la molienda y otro para la homogenización; y
- clinkerización: la harina cruda se trata en horno y se controla mediante un sistema automático que busca estabilizar la temperatura a un máximo de $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ para obtener una producción uniforme.

Datos de entrada (input) y cálculos

El consumo de materias primas (caliza, arcilla y arena) ha sido cuantificado en toneladas según los datos de producción proporcionados por la planta cementera. Estos datos llevan un registro mensual del ingreso hacia los lugares de almacenamiento dentro de la planta. El reporte para el año 2016 es de 556.262,74t. Durante el proceso de trituración la materia prima va perdiendo humedad, por lo que su peso disminuye.

En consumo de energía, se registra el consumo de energía eléctrica y de combustibles como el diésel y el *fuel oil* en MJ y por procesos unitarios. Con relación al combustible, primero se transforma a unidad de energía para lo cual se considera la cantidad consumida y el calor de combustión correspondiente (poder calórico). El poder calórico del *fuel oil* es de $39,2\text{TJ}/1000\text{T}$ y el del diésel es de $40,8\text{TJ}/1000\text{T}$, según datos tomados del Informe 2016 - Factor de emisión de CO_2 del Sistema Nacional Interconectado (CENTRO..., 2016).

Datos de salida (output) y cálculos

Como producto se cuantifica la cantidad de clínker producido en toneladas durante el año de producción, y se lo considera como materia prima del siguiente subsistema, “producción del cemento”.

En las emisiones de CO₂, se estiman las emisiones procedentes de la producción de clínker (calcinación) (HANLE *et al.*, 2006), de la quema de los combustibles fósiles y del consumo de energía eléctrica (GÓMEZ *et al.*, 2006).

Durante la producción de clínker

Se han estimado las emisiones de CO₂ durante la producción de clínker, proceso que se conoce como “calcinación de la caliza”, por medio del Nivel 2, que establece la metodología del IPCC - Emisiones de la industria de los minerales, que considera como buena práctica utilizar datos sobre su producción y su contenido de óxido de calcio (CaO) (HANLE *et al.*, 2006).

Las emisiones de CO₂ durante la producción de clínker se determina a partir de la Ecuación 1:

$$\text{Emisiones CO}_2(t) = Mcl(t) \times EFcl \times CFckd \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Emisiones CO₂: emisiones de CO₂ provenientes de la producción de cemento;

Mcl: masa de la cal producida;

EFcl: factor de emisión para el clínker (CO₂ [t]/clínker[t]); y

CFckd: factor corrector de las emisiones para el polvo de horno de cemento.

El factor de emisión para el clínker (EFcl) se obtiene tomando el factor de emisión de base especificado en la metodología del IPCC (HANLE *et al.*, 2006) y considerando que el contenido de CaO en el clínker es del 42%, que el CaO proviene en un 100% del CaCO₃ y que el 100% se calcina en el horno, según datos de la planta cementera. Por lo tanto, el EFcl resultante es de 0,32.

El factor corrector de las emisiones para el polvo de horno de cemento (CFckd) es 1 (HANLE *et al.*, 2006), pues se estima que no hay pérdidas de CKD dado que la planta cuenta con un sistema colector de polvo que vuelve a ingresar al horno.

Durante la quema de combustibles

Para determinar las emisiones de CO₂ por el uso de los combustibles diésel y *fuel oil*, se aplica el Nivel 1 (GÓMEZ *et al.*, 2006) de la metodología que establece el IPCC – Combustión Estacionaria, a partir de la Ecuación 2:

$$\text{Emisiones GEI}_{\text{combustible}} \text{ (kgGEI)} = \text{Consumo de combustible (TJ)} \times \text{Factor de emisión GEI}_{\text{combustible}} \text{ (kgGEI/TJ)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Emisiones GEI_{combustible}: emisiones de un gas de efecto invernadero dado por tipo de combustible;

Consumo de combustible: cantidad de combustible quemado; y

Factor de emisión GEI_{combustible}: factor de emisión por defecto de un gas de efecto invernadero dado por tipo de combustible. Para el caso del CO₂, incluye el factor de oxidación del carbono, que es 1.

Los factores de emisión de CO₂ de los combustibles utilizados se tomaron del Informe 2016 - Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado (CENTRO..., 2016): *fuel oil* – 75.500kgCO₂/TJ y diésel – 72.600kgCO₂/TJ.

Durante el consumo de energía eléctrica

Para estimar las emisiones de CO₂ por consumo de energía eléctrica, se emplea un método simple y común que consiste en combinar la información sobre el alcance hasta el cual tiene lugar una actividad humana con los coeficientes que cuantifican las emisiones por actividad unitaria (RYPDAL *et al.*, 2006). El valor se determina por la Ecuación 3:

$$\text{Emisiones} = AD \times Ef \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

AD: datos de la actividad; y

Ef: factor de emisión.

Para AD se considera el total de energía consumida y para Ef, el factor de emisión establecido en el Informe 2016 - Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado: 0,6635 [tCO₂/MWh]eq (CENACE, 2017).

Producción de Cemento

Los procesos que intervienen en la producción de cemento son:

- (a) molienda de cemento: inicia con la alimentación de sus componentes; y
- (b) despacho de cemento: se realiza mayoritariamente en fundas de 50kg (84%); el estibado se realiza manualmente.

Datos de entrada (input) y cálculos

El consumo de materias primas (clínker, puzolana y yeso) ha sido cuantificado en toneladas según los datos proporcionados por la planta cementera en el año de estudio. El total de materia prima utilizado para este subsistema es de 476,151t. Es importante mencionar que la puzolana es de origen natural y proviene de la ceniza volcánica extraída de un volcán de la localidad.

En consumo de energía se registra el consumo de combustible (*fuel oil*) y energía eléctrica en MJ en cada uno de los procesos unitarios. Para el cálculo energético de *fuel oil* se considera el valor consumido y el dato de calor de combustión correspondiente (CENTRO..., 2016).

Datos de salida (output) y cálculos

Como producto se cuantifica la cantidad de cemento producido en toneladas durante el año de producción.

En emisiones de CO₂ se estiman las emisiones procedentes de la quema de los combustibles fósiles de acuerdo con la ecuación 2. Las emisiones procedentes del consumo de energía eléctrica se calculan de acuerdo con la ecuación 3 (GÓMEZ *et al.*, 2006).

Evaluación del impacto del ciclo de vida

En esta fase se transforman los datos recopilados en el Inventario en resultados de carácter ambiental, se analizan en el apartado de resultados dos categorías de impacto ambiental correspondientes a calentamiento global y a consumo de recursos energéticos. En calentamiento global se consideran las emisiones de CO₂ por ser un GEI representativo dentro de la producción del cemento (STAFFORD *et al.*, 2016).

Resultados

Datos de entrada y de salida

Consumo de materia prima

Se registra una producción anual de 457.461t de cemento y de 327.344t de clínker. La cantidad de clínker utilizada para esta producción de cemento es de 317.296t, la diferencia se considera como reserva de producción. Se determina que para una tonelada de cemento se requiere 0,694t de clínker. En la Figura 2 se muestra la cantidad de materia prima necesaria en cada subsistema para la producción de una tonelada de cemento.

En el subsistema de producción del clínker, la caliza representa el 95,59% de los materiales; por su parte, en el subsistema de producción del cemento, el clínker representa el 66,64%, seguido del 29,46% de puzolana. Los demás materiales en ambos subsistemas representan menos del 4%.

Energía consumida y emisiones de CO₂

La energía consumida y las emisiones de CO₂ generadas en la producción de una tonelada de cemento son de 3.191,95MJ y 510,57kgCO₂, respectivamente. Del total de energía consumida en el sistema (producción

de clínker más producción de cemento), el mayor consumo energético se registra en el subsistema producción del clínker, ya que representa el 91,44% del total. Una situación similar se puede apreciar en emisiones de CO₂, que son mayores en el primer subsistema, 92,73% frente a un 7,27% del segundo subsistema (Figura 3).

La Tabla 1 muestra la estructuración de los subsistemas (producción de clínker más producción de cemento) y los respectivos valores absolutos de consumo de energía y de emisiones de CO₂ que representan cada uno de los procesos unitarios para la producción de una tonelada de cemento.

El primer subsistema representa la mayor cantidad de consumo energético, con 2.918,87MJ frente a 273,08MJ del segundo subsistema. De igual manera, las emisiones de CO₂ del primer subsistema son de 473,47kgCO₂ y las del segundo subsistema, 37,10kgCO₂. Con relación a los procesos unitarios, las etapas de clinkerización y molienda de cemento son las que consumen mayor energía (2.750,59MJ y 262,53MJ, respectivamente) y, en cada subsistema, representan el 94,23% y el 96,14%. Estas dos etapas también son las de mayor emisión de CO₂: 444,25kgCO₂ (representando el 93,83%) y 35,16kgCO₂ (representando el 94,76%), respectivamente.

Figura 2 - Consumo de materia prima para la producción de una tonelada de cemento

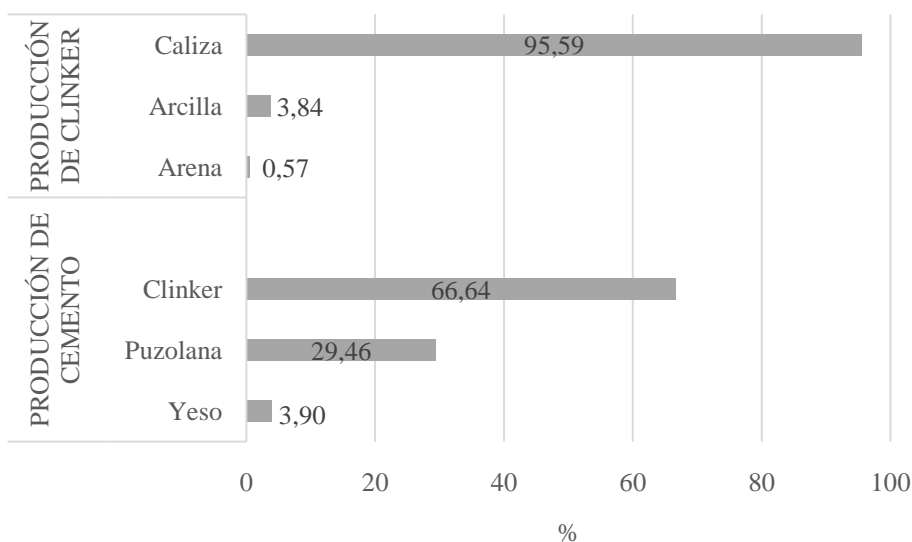
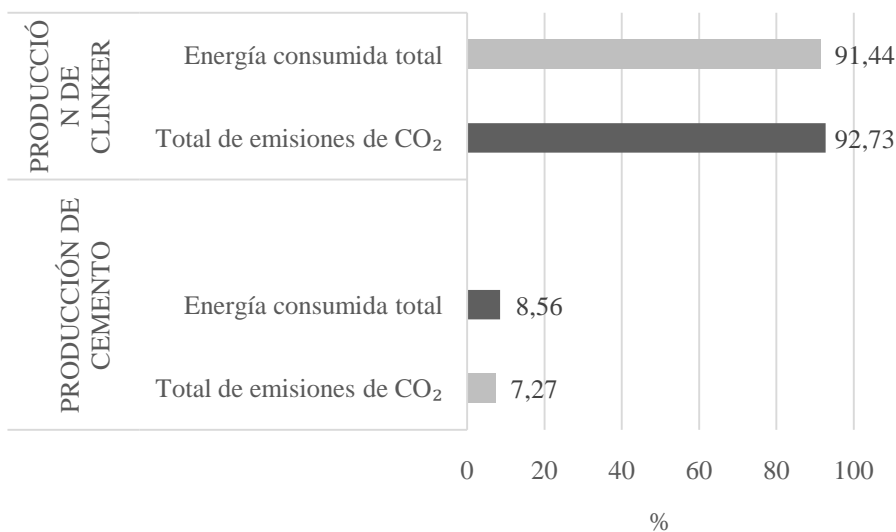


Figura 3 - Energía consumida total y emisiones de CO₂ del sistema en la producción de una tonelada de cemento



En las Figuras 4 y 5 se presenta en porcentajes el peso que representa cada etapa o proceso unitario dentro de cada subsistema. Los subprocesos trituración, prehomogenización, molino de crudo y homogenización del crudo representan menos del 5% en consumo de energía y emisiones de CO₂. De igual manera, el subproceso despacho de cemento representa alrededor del 5% en ambas categorías de impacto ambiental analizadas.

Con relación al consumo energético y emisiones de CO₂ en cada subsistema según el tipo de combustible empleado, en la Figura 6 se muestra que, en el subsistema de producción de clínker, el mayor consumo energético se debe al uso de combustibles fósiles (principalmente el *fuel oil*, que representa el 91,77%).

Tabla 1 - Cuantificación del consumo energético y emisiones de CO₂ de cada proceso unitario en el límite de la planta de cemento

Subsistema	Procesos unitarios	Consumo de energía (MJ/t)	Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /t)
CLÍNKER	1. Trituración	24,48	2,89
	2. Prehomogenización	4,44	0,64
	3. Molino de Crudo	115,22	21,24
	4. Homogenización del crudo	24,14	4,45
	5. Clinkerización (combustible)	2.750,59	215,27
	5. Clinkerización (proceso industrial)		228,98
	Total Subsistema 1	2.918,87	473,47
CEMENTO	1. Molienda de cemento	262,53	35,16
	2. Despacho de cemento	10,55	1,94
	Total Subsistema 2	273,08	37,10
	TOTAL SISTEMA	3.191,95	510,57

Figura 4 - Porcentaje de contribución de energía consumida y emisiones de CO₂ en cada proceso unitario en el subsistema producción de clínker

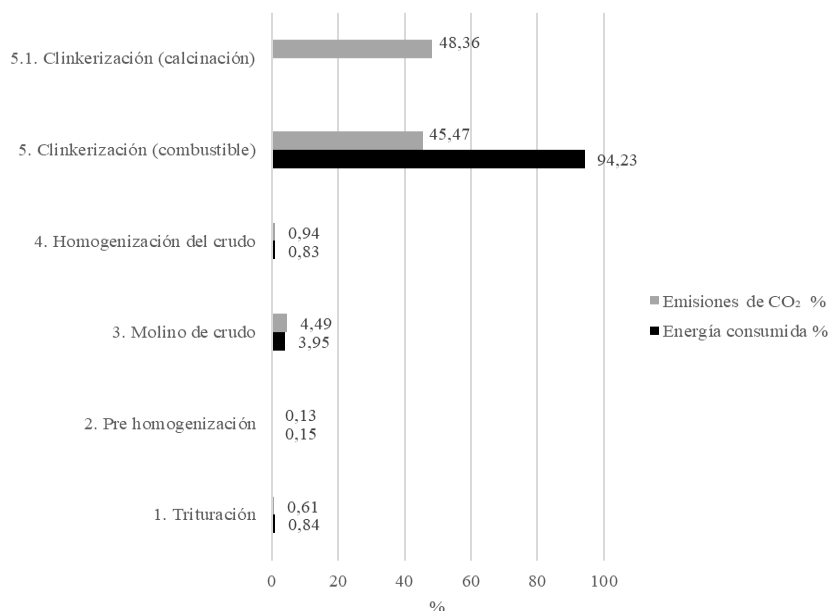


Figura 5 - Porcentaje de contribución de energía consumida y emisiones de CO₂ en cada proceso unitario en el subsistema producción de cemento

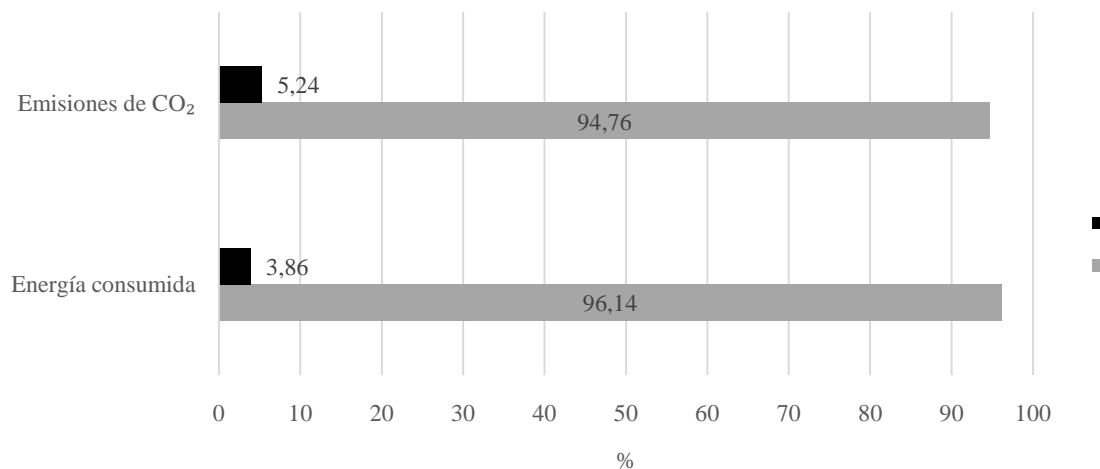
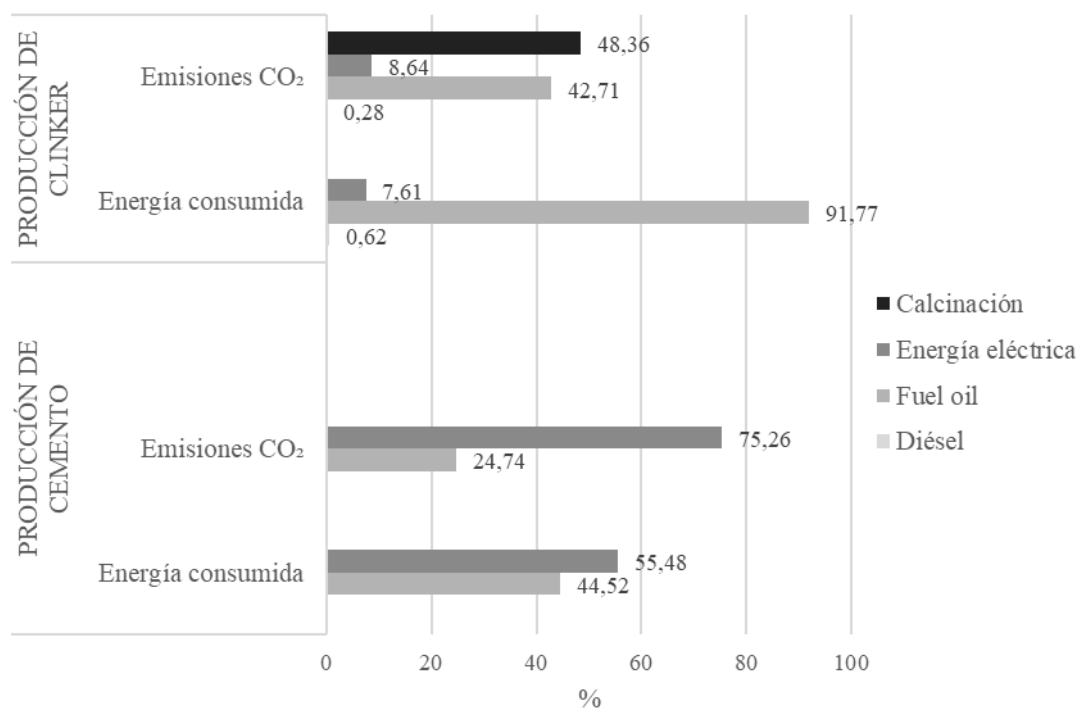


Figura 6 - Energía consumida y emisiones de CO₂ por tipo de combustible en la producción de una tonelada de cemento



En el subsistema de producción de cemento, el uso energía eléctrica equivale al mayor porcentaje del consumo energético, representando el 55,48%, mientras que la utilización de combustible como *fuel oil* representa el 44,52%. En lo que se refiere a emisiones de CO₂, en el primer subsistema, el mayor porcentaje se debe al proceso de calcinación de la caliza (descarbonatación), con 48,36%, seguido de las emisiones producidas por la quema de combustible fósil, que aporta el 42,71%; las emisiones generadas por el uso de energía eléctrica son inferiores a 9%. Sin embargo, en el segundo subsistema, las mayores emisiones se deben al consumo de energía eléctrica representando el 75,26% del total, frente a un 24,74% que aporta el consumo de combustible fósil.

Discusiones

El total de consumo de energía por tonelada de cemento en el límite del sistema “puerta a puerta” es de 3.191,95MJ. En emisiones de CO₂, el total es de 510,57kgCO₂/t, valor que se encuentra por debajo – pero no muy distante – de las emisiones de CO₂ de América Latina y el Caribe (580kgCO₂/t) y del promedio a nivel mundial (616kgCO₂/t).

Según el reporte de la Cement Sustainability Initiative (2018), los resultados de las emisiones de CO₂ en algunos de los países con mayor producción de cemento (excluyendo el CO₂ por la generación de energía *in situ*) corresponden a China, Corea y Japón, con 663kgCO₂/t; India, con 670kgCO₂/t; Unión Europea, con 665kgCO₂/t; América del Norte, con 780kgCO₂/t; y Brasil, con 673kgCO₂/t. Todos estos superan el promedio mundial.

Tabla 2 - Comparación del consumo de energía y las emisiones de CO₂eq en la producción de cemento por diferentes estudios

Estudio	Localización	Tipo de cemento	Consumo de energía (MJ/t de cemento)	Emisiones (kgCO ₂ eq)	Límite del sistema
Li <i>et al.</i> (2015)	China	OPC	5.771,6	799	Cunaa puerta
Li <i>et al.</i> (2015)	Japón	OPC	5.973,1+a+b	779	Cunaa puerta
García - Gusano <i>et al.</i> (2015)	España	OPC	No especifica	799	Cunaa puerta
Feiz <i>et al.</i> (2014)	Suiza	OPC	No especifica	779	Cunaa puerta
Marceau <i>et al.</i> (2006)	USA	OPC	4.800	929	Cunaa puerta
Josa <i>et al.</i> (2007)	EU	OPC	No	920	Cunaa puerta
Chen <i>et al.</i> (2010a)	Francia	OPC	No especifica	782	Cunaa puerta
Strazza I (2010)	Italia	OPC	6.170	769	Cunaa puerta
Bushi and Meli (2014)	Canadá	OPC	6.620	950	Cunaa puerta
Bushi and Meli (2014)	Canadá	PLC	6.020	850	Cunaa puerta
Huntzinger and Eatmon (2009)	USA	OPC	No especifica	880	Cunaa puerta
Crossin (2012)	Australia	OPC	No especifica	850	Cunaa puerta
Uzzsal Hossaina, Chi Sun Poon (2017)	Hong Kong	OPC	5.732	980	Cunaa puerta
Uzzsal Hossaina, Chi Sun Poon (2017)	Hong Kong	PFC	4.790	806	Cunaa puerta
ZHANG; CHENG; LO, (2014)	Hong Kong	OPC	No especifica	917	Puerta a puerta
Esta Investigación	Ecuador	CPP	3.191,95	510,57	Puerta a puerta

Nota:

OPC: Cemento Portland ordinario;
 PFC: Cemento Portland de cenizas volantes;
 PLC: Cemento Portland de piedra caliza;
 CPP: Cemento Portland puzolánico;
 a: combustible de biomasa, en su mayoría, residuos de madera y papel; y
 b: combustible de residuos fósiles reciclados, principalmente residuos de llantas y aceite.

Otros datos de energía contenida y de emisiones de CO₂ de diferentes países identificados por Hossain *et al.* (2017) se presentan en la Tabla 2, la mayoría de estos cuentan con un límite del sistema de “cuna a puerta”. El enfoque del sistema establecido en el caso de estudio de Ecuador es “puerta a puerta” por lo que no es posible establecer parámetros de comparación en igualdad de condiciones. No se consideró la etapa de extracción de materia prima porque no se contó con la información; tampoco se consideraron datos del extranjero porque estos pueden generar errores de hasta el 50% (LU; LE; SONG, 2017). Sin embargo, tomando los valores como referencia, se puede identificar que los valores obtenidos en Ecuador y los otros países difieren ampliamente, permitiendo suponer que la energía contenida y las emisiones de CO₂ en la etapa de extracción de materia prima hasta que llega a la fábrica es significativa. Por el contrario, en el estudio de JOSA *et al.* (2004), se ha identificado que, en promedio, la etapa en la que intervienen canteras, minería y transporte representan el 1% y 3%, respectivamente. De igual manera, el estudio de Zhang, Cheng y Lo (2014) indica claramente que la parte de producción de cemento representa la mayor parte de las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de “cuna al sitio” (91%), la etapa de extracción representa el 2%, y el transporte, el 7%.

Por otro lado, se ha determinado que el horno es el responsable por el mayor consumo energético, con el 86%, y que representa las mayores emisiones de CO₂, con el 87%. Este último valor es similar al del estudio de Stafford *et al.* (2016), en el que el horno es el responsable por el 83,2%. Además, se determinó que el 44,8% de las emisiones de CO₂ en la producción del cemento se debe a las reacciones químicas de la producción del clínker, el 41,7% se debe al consumo total de combustibles fósiles de cada etapa, y el 13,5%, se debe al consumo de electricidad (en Ecuador, el 60% de la electricidad proviene de hidroeléctricas y otras fuentes renovables). Con relación a estos porcentajes, el estudio de Josa *et al.* (2004), que analiza varias investigaciones de ACV relacionadas con la producción del cemento en la UE, determina que el 59% de las emisiones de CO₂ se deben a las reacciones químicas de la producción de clínker, el 35% se debe al consumo de combustibles y el 6% se debe a otros consumos de energía. Por su parte, el estudio de Stafford *et al.* (2016) presenta que el 57% se debe a las reacciones químicas de la producción del clínker, el 37% se debe al consumo de combustible en cada etapa y el 6% en otras etapas de todo el sistema. Es posible que los menores porcentajes de emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles en los dos estudios se deba a que generalmente en Europa existe un mayor uso de combustibles alternativos (JOSA *et al.*, 2004).

Conclusiones

Esta investigación aportó datos cuantitativos de energía y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación de cemento en el Ecuador y determinó que una tonelada de cemento consume 3.191,95MJ de energía y genera 510,57kgCO₂.

La estructuración del inventario en dos subsistemas (producción de clínker y producción de cemento) ha permitido realizar un análisis detallado por separado de cada uno de los procesos de producción. Se ha determinado que las emisiones se producen principalmente en la fabricación de clínker debido a las reacciones químicas que se originan en el proceso de calcinación de la caliza (descarbonatación) y por la quema del combustible fósil (principalmente *fuel oil*), mientras que el mayor consumo energético se debe a la etapa de clinkerización.

El análisis comparativo del inventario entre varios estudios presenta dificultades debido a la definición poco clara de los aspectos considerados dentro de los límites del sistema y a la escasa disponibilidad de datos confiables, sobre todo por el restringido acceso a los datos que a veces impone la industria.

Adicionalmente, esta investigación utilizó un método vigente en diversos estudios debido a que la aplicación de la metodología del ACV permite medir diversos impactos ambientales. En el caso de Ecuador, ha permitido medir el impacto de las emisiones de CO₂ dentro de las categorías calentamiento global y el impacto por consumo de recursos energéticos, datos que podrán ser almacenados en una base nacional sobre materiales de la construcción.

El marco metodológico planteado en este estudio servirá de base para continuar con la realización de otros estudios con alcances similares o mayores, en los que se priorice la obtención de datos primarios, ya que significa mayor precisión y confiabilidad, permitiendo una evaluación de impacto sobre escenarios reales.

Finalmente, este tipo de estudio puede incentivar a las fábricas a mejorar sus procesos, haciéndolos más eficientes y reduciendo los impactos ambientales generados durante su etapa de producción, por medio de la aplicación de estrategias, como la utilización de combustibles alternativos, el uso de energías renovables, la implementación de mejoras tecnológicas, la sustitución de la materia prima, entre otros.

Referencias

- AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano 2016**. Quito, 2017.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 150041 EX**: análisis del ciclo de vida simplificado. Madrid, 1998.
- CARDIM DE CARVALHO FILHO, A. **Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento**: aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **CO2 and energy accounting and reporting standard for the cement industry**. Geneva, 2011.
- CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **GNR PROJECT Reporting CO2**. Disponible: <https://www.wbcscement.org/GNR-2016/>. Acceso: 25 mar. 2018.
- CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE LA ENERGÍA. **Informe 2016**: factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado 2016. Quito, 2016.
- CHEN, W. *et al.* Life cycle based emergy analysis on China's cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 272–279, may 2016.
- COMISIÓN EUROPEA. **Reglamento (UE) N. 601/2012**, de la Comisión de 21 de junio de 2012 sobre el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en aplicación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. 2012. Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0601&from=EN>. Acceso: 5 Jun. 2018.
- FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO. Informe estadístico 2018: cifras de la industria del cemento. **Cemento & Concreto**, Bogotá, v. 5, p. 8–12, 2018.
- GÓMEZ, D. R. *et al.* Energía: combustión estacionaria. In: DIRECTRICES del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Kanagawa: IGES, 2006.
- GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. **Cambio Climático 2014**: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, 2014.
- GUAPAN. **Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo Ambiental para el coprocesamiento de desechos peligrosos en la Planta Industrial Guapán de la Empresa Unión Cementera Nacional UCEM C.E.M.** Azogues, 2017.
- HANLE, L. *et al.* Productos industriales y usos del producto: emisiones de la industria de los minerales. In: DIRECTRICES del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Kanagawa: IGES, 2006.
- HOLCIM ECUADOR S.A. **Memoria de sostenibilidad 2017**. Guayaquil, 2017.
- HOSSAIN, M. U. *et al.* Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: a Hong Kong case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 199–208, 2017.
- HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009.
- IHOBE S.A. **Análisis de ciclo de vida y huella de carbono**. Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca Gobierno Vasco, Bilbao, 2009.
- INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. **Comercialización anual de cemento gris por empresa**. Disponible: <http://www.inecyc.org.ec/comercializacion-anual-de-cemento-gris-por-empresa/>. Acceso: 13 Feb. 2018.
- JOSA, A. *et al.* Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1313–1320, 2004.
- LI, C. *et al.* The life cycle inventory study of cement manufacture in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 204–211, 2014.

- LIU, B. *et al.* Embodied energy consumption of the construction industry and its international trade using multi-regional input–output analysis. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 489–501, 2018.
- LU, Y.; LE, V. H.; SONG, X. Beyond Boundaries: a global use of life cycle inventories for construction materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 876–887, 2017.
- MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365–385, abr./jun. 2018.
- MERCADER, M. P.; RAMÍREZ DE ARELLANO, A.; OLIVARES, M. Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. **Informes de la Construcción**, v. 64, n. 527, p. 401–414, 2012.
- MIKULČIĆ, H. *et al.* Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 119–132, 2016.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR. **Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**. Quito, 2017.
- MORETTI, L.; CARO, S. Critical analysis of the Life Cycle Assessment of the Italian cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 198–210, 2017.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. **NTE INEN 2380**: cementos hidráulicos: requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. Quito, 2011.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. **NTE INEN 490**: ementos hidráulicos compuestos: requisitos. Quito, 2011.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. **NTE INEN-ISO 14040**: gestión ambiental: evaluación del ciclo de vida: principios y estructura. Quito, 2000.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. **NTE INEN-ISO 14044**: gestión ambiental: análisis de ciclo de vida: requisitos y directrices. Quito, 2014.
- PETEK GURSEL, A. *et al.* Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 38–48, 2014.
- RYPDAL, K. *et al.* Orientación general y generación de informes: introducción a las directrices de 2006. In: DIRECTRICES del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Kanagawa: IGES, 2006.
- SALAS, D. A. *et al.* Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114–122, 2016.
- SALAS, D. *et al.* Defining purpose and scope for environmental analysis life cycle cement in Ecuador. 2015. In: LACCEI ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE: “ENGINEERING EDUCATION FACING THE GRAND CHALLENGES, WHAT ARE WE DOING?” **Proceedings [...]** Santo Domingo: LACCEI, 2015.
- SONG, D. *et al.* Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. **Applied Energy**, v. 164, p. 916–923, 2016.
- STAFFORD, F. N. *et al.* Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 159–165, 2016.
- SUMMERBELL, D. L.; BARLOW, C. Y.; CULLEN, J. M. Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: a cement industry case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1327–1339, 2016.
- THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **World cement production 2016, by region and main countries, %**. Disponible: <https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures/>. Acceso: 5 Jun. 2018.
- UNIÓN ANDINA DE CEMENTOS S.A.A. **Reporte de sostenibilidad 2016**. Lima: Asociación UNACEM, 2016. Disponible: https://www.unacem.com.pe/?page_id=5960 . Acceso: 5 Jun. 2018.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Protocolo de gases de efecto invernadero**. Geneva, 2006.

ZABALZA, I.; VALERO, A.; ARANDA, A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

ZHANG, J.; CHENG, J. C. P.; LO, I. M. C. Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 4, p. 745–757, abr. 2014.

ZHANG, Z.; WANG, B. Research on the life-cycle CO₂ emission of China's construction sector. **Energy and Buildings**, v. 112, n. 92, p. 244–255, 2016.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de Cuenca y su Dirección de Investigación (DIUC) por el apoyo y financiamiento al Proyecto de Investigación "Modelo de evaluación de la sustentabilidad de desarrollos urbanos para la ciudad de Cuenca – Ecuador", del cual forma parte este estudio.

Ana León-Velez

Facultad de Arquitectura y Urbanismo | Universidad de Cuenca | Av. 12 de Abril y Av. Loja | Cuenca Ecuador | Cuenca - Ecuador | 010104 | E-mail: ana.leonv@ucuenca.edu.ec

Vanessa Guillén-Mena

Facultad de Arquitectura y Urbanismo | Universidad de Cuenca | E-mail: vanessa.guillen@ucuenca.edu.ec

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.