

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE CICLO DE VIDA ENTRE ADOQUINES DE CONCRETO Y CENIZA VOLCÁNICA PRODUCIDOS EN AREQUIPA, PERÚ

Efraín Llica Alvarez (UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO) [efrain.lica@ucsp.edu.pe](mailto:efrain.lica@ucsp.edu.pe)  
Javier Montalvo Andía (UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO) [jpmontalvo@ucsp.edu.pe](mailto:jpmontalvo@ucsp.edu.pe)

## Resumen

Este estudio evaluó los impactos ambientales generados por adoquines de concreto, y adoquines elaborados a partir de cenizas volcánicas sin presencia de cemento, mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida (ACV). El estudio fue desarrollado siguiendo los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044, desde la etapa de obtención de materia prima hasta la etapa de uso, se consideró como unidad funcional del estudio 1m<sup>2</sup> de adoquines pavimentados. Los resultados fueron analizados con el software de PRÉ Consultants SimaPro 8.5.2.0 con datos modelados en Ecoinvent 3.4, mediante la metodología de evaluación de impactos de ciclo de vida ReCiPe 2016 a nivel de categorías intermedias.

**Palabras Claves:** (Análisis de Ciclo de Vida, adoquines, adoquines de concreto, adoquines de ceniza volcánica, SimaPro, ReCiPe 2016)

## 1. Introducción

El sector construcción a nivel global es uno de los principales demandantes de materias primas y energía (Castell et al., 2013; Koroneos & Dompros, 2007), y el principal agotador de recursos naturales (Sieffert, Huygen, & Daudon, 2014), los altos ratios de consumo global han demostrado la demanda, el desarrollo y la expansión de una construcción sostenible (Robichaud & Anantatmula, 2011), siendo así necesario cuantificar y evaluar el impacto ambiental de edificaciones y materiales de construcción (Hill & Bowen, 1997).

El cemento es uno de los principales materiales manufacturados a nivel mundial (Huntzinger & Eatmon, 2009), aproximadamente entre 0.85 y 1 tonelada de CO<sub>2</sub> es emitida a la atmósfera por cada tonelada de cemento producida en cualquier parte del mundo, debido principalmente a la descomposición del carbonato de calcio (0.55 toneladas de CO<sub>2</sub>) y la energía requerida para la reacción del clínker a temperaturas superiores a los 1300°C (0.45 toneladas de CO<sub>2</sub>) (Davidovits, 2015). Aproximadamente 5% de las emisiones globales de carbón son originadas a partir de los procesos de manufactura del cemento (Huntzinger & Eatmon, 2009; Singh, Gupta, & Bhattacharyya, 2015), y en promedio 1 tonelada de concreto es producida cada año por cada ser humano (Huntzinger & Eatmon, 2009). Estudios recientes aportan y sustentan el

uso de materiales alternativos al cemento, entre ellos materiales puzolánicos (Jackson et al., 2013), y geopolímeros (Davidovits, 2015).

Los análisis de ciclo de vida (ACV) son recomendados para identificar fases y etapas que demanden alto uso de energía y recursos, con el objetivo de desarrollar estrategias para la reducción de estos impactos (Ramesh, Prakash, & Shukla, 2010; Russell-Smith, Lepech, Fruchter, & Meyer, 2015), convirtiéndose en una herramienta valiosa para mejorar nuestra comprensión de los peligros ambientales presentes en las etapas de vida de un producto (Huntzinger & Eatmon, 2009).

Este estudio analizará el impacto ambiental de adoquines de tránsito ligero, donde se comparará el desempeño ambiental de un adoquín convencional de concreto respecto a un adoquín de formulación alternativa, elaborado a partir de ceniza volcánica activada con hidróxido de sodio y silicatos de sodio y aluminio.

Los adoquines fueron producidos en Arequipa, Perú, ciudad donde la oferta anual de adoquines durante el 2017 fue de aproximadamente 24 millones de unidades (Tejada & Loayza, 2017).

## **2. Métodos**

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida usada en este estudio sigue las consideraciones de las normas ISO 14040 e ISO 14044. Las fases desarrolladas comprenden:

- a) Definición del objetivo y alcance
- b) Análisis de inventario de ciclo de vida (AICV)
- c) Evaluación de impactos ambientales de ciclo de vida (EICV)
- d) Interpretación de resultados

### **2.1. Definición del objetivo y alcance del estudio**

El objetivo de este estudio es evaluar, cuantificar y comparar los impactos ambientales de (a) adoquines de concreto y (b) adoquines elaborados a partir de cenizas volcánicas producidos en la ciudad de Arequipa - Perú, mediante la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

La unidad funcional para el estudio es definida como 1m<sup>2</sup> de adoquines pavimentados. Los adoquines pavimentados deberían cumplir con la principal función de resistir el tránsito

peatonal y vehicular, expresado en una resistencia a la compresión mínima de 420 kg/cm<sup>2</sup>. El escenario de residuo no es considerado en el estudio, debido a que es relativamente similar para ambos productos. Las características físicas de ambos adoquines corresponden a los estándares establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 339.611(ver Tabla 1).

Tabla 1. Características de los productos estudiados

Características	Adoquín de cemento	Adoquín de ceniza volcánica
Espesor (cm.)	6	6
Largo (cm.)	20	20
Ancho (cm.)	10	10
Resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )	420	420
Rendimiento (Adoquines/m <sup>2</sup> )	50	50

## 2.2. Inventario de Ciclo de Vida

Los límites de los sistemas en estudio (Ver Fig.1 y Fig.2) abarcan desde la obtención de las materias primas hasta su uso en la instalación de 1m<sup>2</sup> de adoquines pavimentados, expresado como la unidad funcional del estudio.

Se usó la distribución gráfica para sistemas propuesta por Maia de Souza et al. (2016).

Figura 1. Límites del sistema para los adoquines de concreto

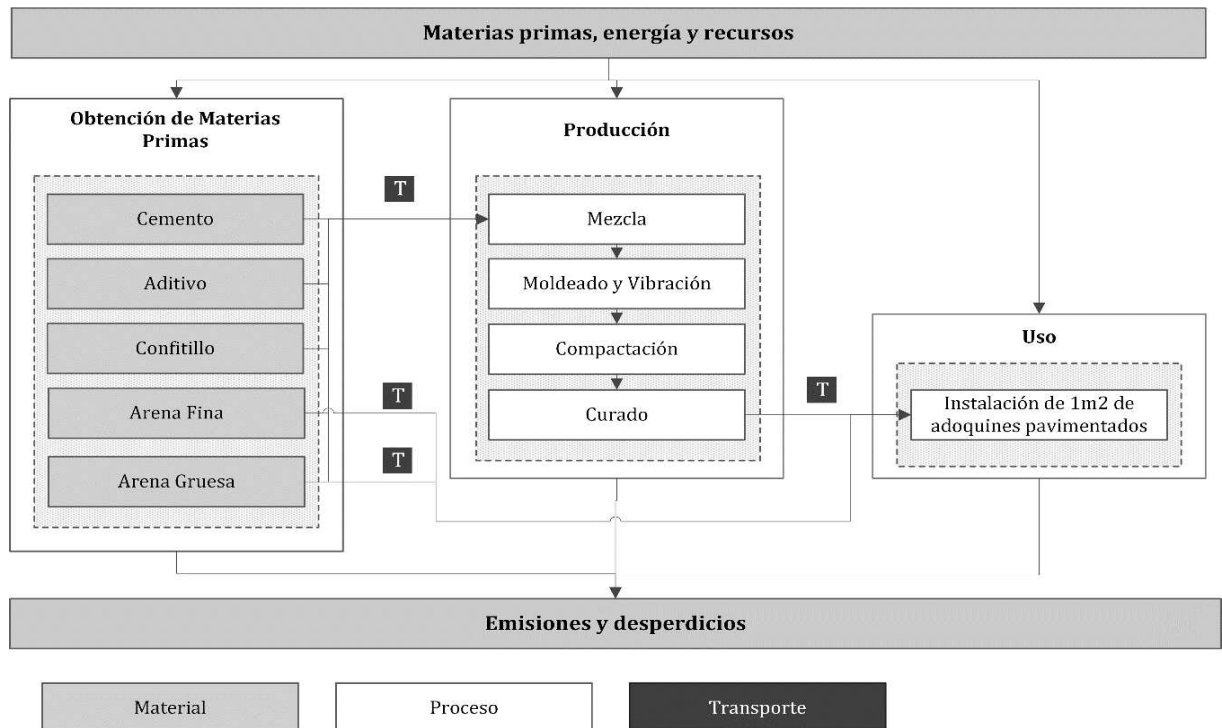
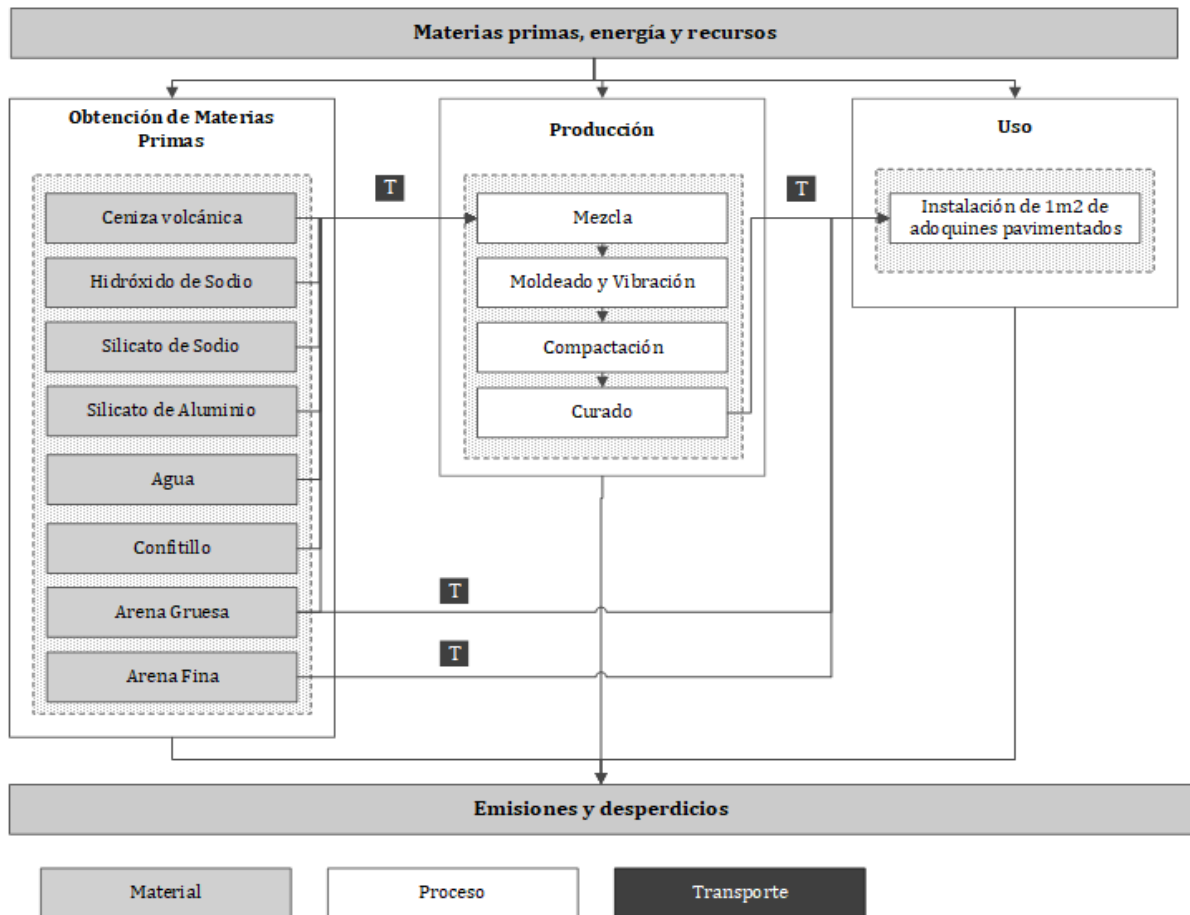


Figura 2. Límites del sistema para los adoquines de ceniza volcánica



Los datos de entradas y salidas de los sistemas, se obtuvieron a partir de visitas técnicas realizadas durante la segunda mitad del 2018 a una planta procesadora de adoquines ubicada en Arequipa, Perú, donde se llevaron a cabo las pruebas.

La formulación para la fabricación de adoquines de ceniza volcánica fue basada en las investigaciones desarrolladas por Almirón, Apaza, Churata, Tupayaychi, & Velazco (2018); y Pérez (2018) posteriormente estos datos fueron consultados y modelados en Ecoinvent v3.4.

La primera etapa del ciclo de vida de los productos analizados empieza con la obtención de las materias primas para iniciar el proceso productivo, estas se detallan en las Tablas 2 y 3, tomando como referencia el requerimiento mínimo de material para la producción de un adoquín tipo II.

Posteriormente estos insumos (dependiendo del adoquín) son mezclados mecánicamente hasta formar la consistencia necesaria para ser moldeadas, mediante la vibración se eliminan los espacios de aire que pudieran existir para que luego sean compactados y pasen a una etapa de

curado. Por la naturaleza de sus insumos estos adoquines manejan un proceso de curado distinto, los adoquines de concreto requieren un proceso de curado por humedad (en este caso aspersión discontinua durante las primeras 48 horas) y almacenamiento de 28 días, los adoquines de ceniza volcánica deben ser almacenados en cámaras de curado a una temperatura aproximada de 80°C durante 48 horas, para luego ser almacenadas por 28 días.

Tabla 2. Materia prima requerida para la elaboración de 1 adoquín de ceniza volcánica

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Ceniza volcánica	1.2	kg
Silicato de sodio	68	g
Silicato de aluminio	0.02	kg
Arena gruesa	0.4	kg
Hidróxido de sodio	102	g
Confitillo	1.0	kg
Agua	490	ml

Tabla 3. Materia prima requerida para la elaboración de 1 adoquín de concreto

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Arena Fina	0.204	kg
Arena Gruesa	2.023	kg
Confitillo	0.078	kg
Cemento Portland	0.590	kg
Aditivo	0.0013	kg
Agua	550	ml

Tabla 4. Distancias de recorrido

<b>Distancias de recorrido totales</b>	<b>Adoquines de concreto</b>	<b>Adoquines de puzolana</b>
Transporte desde la planta productora de cemento hacia la planta de producción	23 km	
Transporte desde los depósitos de ceniza volcánica hasta la planta de producción		98 km
Transporte de agregados (arena fina, arena gruesa, confitillo) hasta la planta de producción	20 km	20 km
Transporte de insumos químicos desde las instalaciones del proveedor (hidróxido de sodio, silicatos de sodio y aluminio, aditivos) hasta la planta de producción	6.km	6.km

### 2.3. Análisis de Impactos de Ciclo de Vida

En este estudio, los datos presentados fueron procesados por el software SimaPro 8.5.2.0, usando el método de evaluación de impactos ReCiPe 2016 v1.02 (Huijbregts et al., 2016), a nivel de categorías intermedias o midpoints (ver Tabla 5), en versión individualista (tiempo de proyección a 20 años). El método fue escogido por ser de alcance global.

### 3. Resultados

Los resultados son expresados a nivel de categorías intermedias, si bien en la tabla 5 se muestran las 18 categorías de impacto intermedias de ReCiPe 2016, para el estudio es relevante comprender las categorías de calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, y consumo de agua.

Tabla 5. Resultados expresados a nivel de categorías intermedias ReCiPe 2016

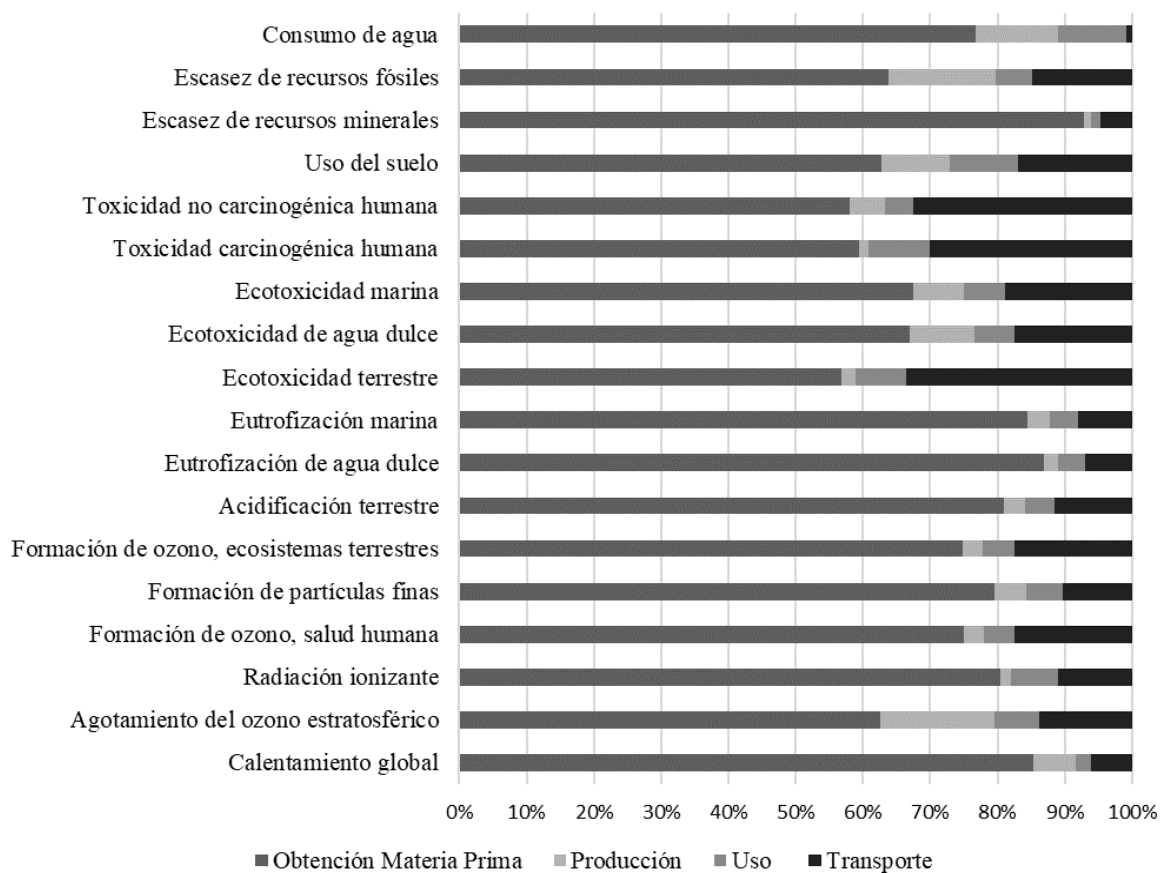
Categoría de Impacto	Unidad	Adoquín de ceniza volcánica	Adoquín de concreto
Calentamiento global	kg CO2 eq	32.7844673	36.4660441
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	1.5358E-05	3.79739E-06
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	1.03864592	0.33139582
Formación de ozono, salud humana	kg NOx eq	0.07128113	0.071641913
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq	0.01755596	0.008160901
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NOx eq	0.07261913	0.072595303
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0.07828408	0.066351902
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.00670093	0.003149332
Eutrofización marina	kg N eq	0.00057547	0.00020834
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	37.9560286	22.84778955
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	0.63758711	0.259617373
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0.2083272	0.088937978
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0.01094276	0.006663945
Toxicidad no carcinogénica humana	kg 1,4-DCB	0.41311219	0.252076538
Uso del suelo	m2a crop eq	0.61829794	0.35254237
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.04407845	0.089710963
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	9.07210553	4.726297063
Consumo de agua	m3	1.0429389	0.744950116

### 3.1. Adoquines de Concreto

En caso de los adoquines de concreto, la mayor parte de los impactos ambientales son generados durante la etapa de obtención de materia prima, el uso del cemento es el mayor causante de los impactos asociados a la producción de este adoquín, de los 36.46 kgCO<sub>2</sub> equivalentes emitidos por la producción de 1m<sup>2</sup> de adoquines, el cemento es responsable de la emisión de 29.36 kgCO<sub>2</sub> eq, cantidad superior a la emisión de 1m<sup>2</sup> de adoquines de ceniza volcánica pavimentados, el cemento también resulta responsable del 49% de los kgCFC11 equivalentes estimados en el indicador de calentamiento global.

Sin embargo, los adoquines de concreto presentan un mejor desempeño ambiental en las categorías de agotamiento del ozono estratosférico y consumo de agua que los adoquines de ceniza volcánica.

Figura 3. Resultados normalizados para los adoquines de concreto en categorías intermedias ReCiPe 2016



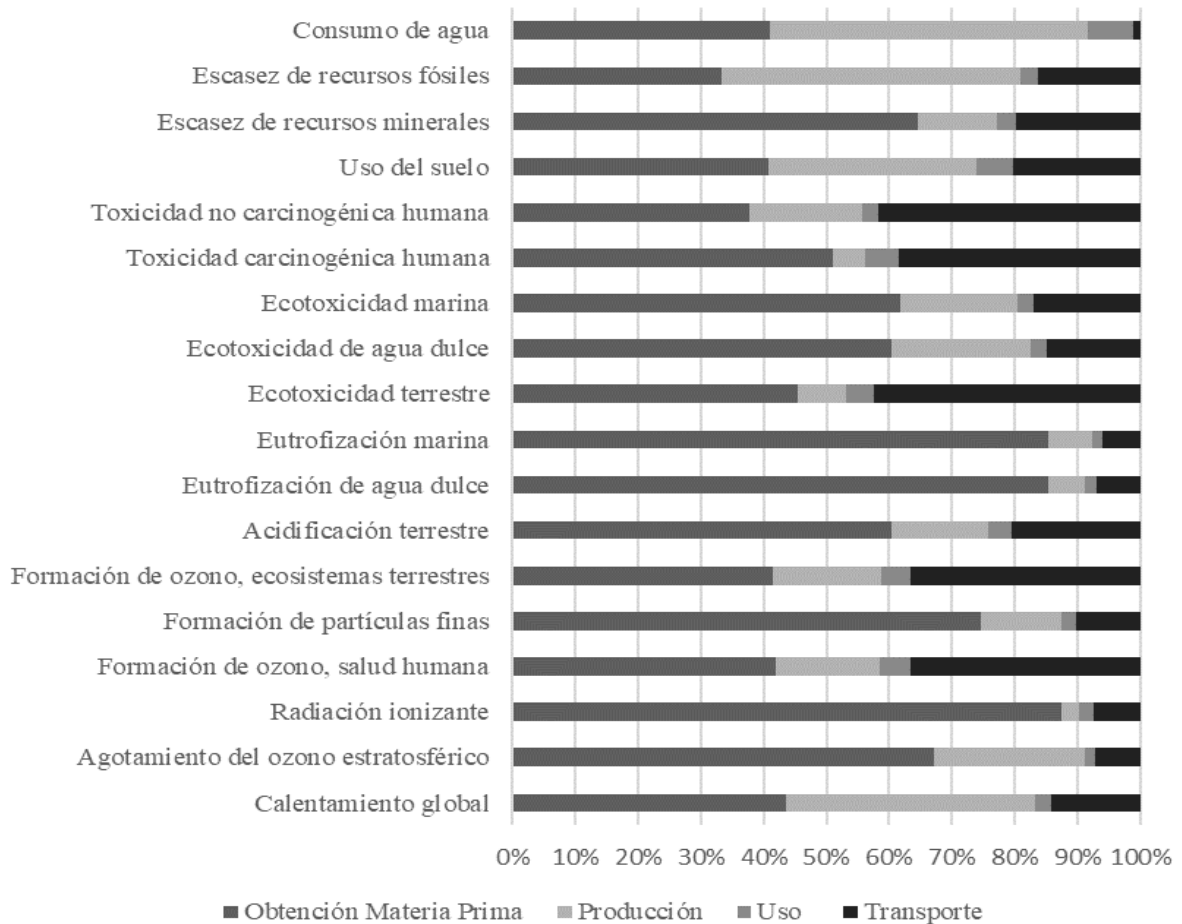
### 3.2. Adoquines de ceniza volcánica

En caso de los adoquines de ceniza volcánica la mayor parte de los impactos se distribuyen entre las etapas de obtención de materia prima y producción, en algunas categorías de impacto el transporte representa un factor importante, debido a la distancia entre los depósitos de ceniza volcánica del volcán Ubinas y la planta de producción.

En la primera etapa, el uso de insumos como el hidróxido de sodio y el silicato de sodio constituyen las principales cargas, juntos contribuyen al 85% de emisiones (10.9 kgCO<sub>2</sub> eq.) y 80% de consumo de agua (0.3 m<sup>3</sup>) durante esta etapa.

Durante la etapa de producción, el curado es el proceso con mayor contribución en emisiones (10.30 kgCO<sub>2</sub> eq.), debido al alto consumo energético de este proceso.

Figura 4. Resultados normalizados para los adoquines de ceniza volcánica en categorías intermedias ReCiPe 2016.





#### 4. Conclusiones

En relación a la categoría de calentamiento global, 1 m<sup>2</sup> de adoquines de concreto (36.46 kg/CO<sub>2</sub> eq.) impacta 11% más que 1 m<sup>2</sup> de adoquines de ceniza volcánica (32.78 kg/CO<sub>2</sub> eq.), ello debido al conjunto de emisiones asociadas a los procesos de obtención del cemento.

En relación a la categoría de agotamiento del ozono estratosférico, 1m<sup>2</sup> de adoquines de ceniza volcánica (1.53E-05kg CFC11 eq.) impacta 75% más que 1m<sup>2</sup> de adoquines de concreto (3.79E-06 kg CFC11 eq.), ello debido al uso de hidróxido de sodio en el proceso de producción, responsable del 47.96% de la carga.

En relación a la categoría de consumo de agua, 1m<sup>2</sup> de adoquines de ceniza volcánica (1.04 m<sup>3</sup>) impacta más que 1 m<sup>2</sup> de adoquines de concreto (0.74 m<sup>3</sup>), ello debido al consumo de energía eléctrica durante el curado de los adoquines y el uso de hidróxido de sodio, siendo responsables del 69% de la carga de consumo.

#### 5. Referencias Bibliográficas

Almirón, J., Apaza, F., Churata, R., Tupayaychi, P., & Velazco, F. (2018). Estudio de la ceniza de volcanes peruanos como materia prima para la industria de la construcción. In *VII Foro Internacional - Los volcanes y su impacto*.

Castell, A., Menoufi, K., de Gracia, A., Rincón, L., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2013). Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs). *Applied Energy*, 101, 600–608. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.066>

Davidovits, J. (2015). *False Values on CO<sub>2</sub> Emission For Geopolymer Cement/Concrete published In Scientific Papers. Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library*.

Gutierrez, B. L. (2018). “ Fabricación de morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de residuos inorgánicos mineros como producto alternativo a morteros de cemento Portland ” Presentado por :

Hill, R. C., & Bowen, P. A. (1997). Sustainable construction: Principles and a framework for attainment. *Construction Management and Economics*, 15(3), 223–239. <https://doi.org/10.1080/014461997372971>

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016 v1.1. A harmonized life cycle impact

- assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. *RIVM Report 2016-0104a*. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, *17*(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- Jackson, M. D., Moon, J., Gotti, E., Taylor, R., Chae, S. R., Kunz, M., ... Monteiro, P. J. M. (2013). Material and elastic properties of Al-tobermorite in ancient roman seawater concrete. *Journal of the American Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1111/jace.12407>
- Koroneos, C., & Dompros, A. (2007). Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*, *42*(5), 2114–2123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.006>
- Maia de Souza, D., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., & Lima, L. (2016). Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>
- Pérez, L. (2018). *Evaluación mecánica y química de geopolímeros obtenidos a partir de ceniza del volcán Ubinas activada con hidróxido de sodio y silicato de sodio, para determinar su desempeño conforme a normativa para un adocreto*. Universidad Católica San Pablo.
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, *42*(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- Robichaud, L. B., & Anantatmula, V. S. (2011). Greening Project Management Practices for Sustainable Construction. *Journal of Management in Engineering*, *27*(1), 48–57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000030)
- Russell-Smith, S. V., Lepech, M. D., Fruchter, R., & Meyer, Y. B. (2015). Sustainable target value design: Integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, *88*, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.025>
- Sieffert, Y., Huygen, J. M., & Daudon, D. (2014). Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering-architecture collaboration. *Journal of*

*Cleaner Production*, 67, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.018>

Singh, B., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>

Tejada, M., & Loayza, E. (2017). *Proyecto de inversión para la producción y comercialización de adoquines ecoamigables hechos a partir de residuos mineros en la provincia de Arequipa al 2017*. Universidad Católica San Pablo.