

Análisis biofísico del ciclo de vida en la producción de ecoladrillos en las islas Galápagos

Biophysical analysis of the life cycle in the production of eco-bricks in the Galapagos islands

Fernando Pinzón¹, Rony Parra Jácome²
Recibido: 05/09/2024 y Aceptado: 9/12/2024



9



Resumen

Los recursos minerales y energéticos en las Islas Galápagos son limitados, lo que afecta las dinámicas socioeconómicas, sobre todo en la construcción de edificaciones. Los materiales de construcción deben importarse desde continente, lo que incrementa el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Como alternativa para reducir la presión sobre el ecosistema, se ha comenzado a producir y utilizar ecoladrillos fabricados con vidrio reciclado, siguiendo los principios de la economía circular (EC). No obstante, la producción de ecoladrillos requiere energía y materiales imprevistos, lo que podría afectar su sostenibilidad. El estudio se propuso analizar los flujos biofísicos presentes en la producción de ecoladrillos en Galápagos, con un enfoque particular en las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) derivadas del consumo de materiales y energía. Utilizando la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV), se determinó que la producción de 16,800 ecoladrillos generó 5 toneladas de CO_{2e}. El uso de cemento fue responsable del 79.40% de las emisiones totales y del 62.2% de la energía utilizada. En comparación con la producción de un bloque de hormigón convencional, la energía incorporada se reduce en un 12.5%, mientras que las emisiones aumentaron en un 16.8%.

PALABRAS CLAVE: Ecoladrillos, Análisis del Ciclo de Vida, energía incorporada, huella de carbono, CO₂, economía circular, Galápagos.

Abstract

11

Mineral and energy resources in the Galapagos Islands are limited, which affects socio-economic dynamics, especially in building construction. Building materials must be imported from the mainland, which increases fossil fuel consumption and greenhouse gas (GHG) emissions. As an alternative to reduce pressure on the ecosystem, eco-bricks made from recycled glass have started to be produced and used, following the principles of the circular economy (CE). However, the production of eco-bricks requires unforeseen energy and materials, which could affect their sustainability. The study set out to analyze the biophysical flows present in the production of eco-bricks in Galapagos, with a particular focus on carbon dioxide equivalent (CO_{2e}) emissions derived from material and energy consumption. Using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, it was determined that the production of 16,800 eco-bricks generated 5 tons of CO_{2e}. The use of concrete was responsible for 79.40% of the total emissions and 62.2% of the energy used. Compared to the production of a conventional concrete block, embodied energy is reduced by 12.5%, while emissions increased by 16.8%.

KEYWORDS: Eco-bricks, Life Cycle Assessment, embodied energy, carbon footprint, CO₂, circular economy, Galápagos.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, las edificaciones son responsables del 39% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con el consumo de energía (FFLA, 2023). Mientras que solo el sector del cemento es responsable del 7% del total de las emisiones mundiales de CO₂ (Islam, et al., 2024). De acuerdo con el Banco Central del Ecuador (BCE), aunque la construcción es una industria intensiva en energía, representó el quinto sector más importante de la economía ecuatoriana, siendo que, en el año 2022 aportó con el 6.1% del Producto Interno Bruto (PIB) ecuatoriano (CCQ, 2023).

En Galápagos el desarrollo del sector de la construcción enfrenta múltiples desafíos, no solo por la fragilidad de su ecosistema, sino por la dinámica demográfica y la demanda de infraestructura. De acuerdo con los datos del censo 2022 la población y las viviendas ocupadas crecieron en un 13 % sobre las reportadas en el censo 2015. La población pasó de 25.2 a 28.5 mil habitantes, mientras que las viviendas ocupadas pasaron de 8.5 a 9.6 mil en solo 7 años. Se muestra también que el 96% (9,268) de viviendas usa hormigón, bloques o ladrillos para la construcción de paredes, y el 42.02% (4,058) tiene loza de hormigón en el techo (INEC, 2023; INEC, 2015).

Por su parte: a) la disminución de los stocks de materiales pétreos en las minas de piedra volcánica dentro del Parque Nacional (Euroclima y Mentefactura, 2020); b) la reducción en la disponibilidad de agua dulce debido a alteraciones en los patrones de lluvia y al aumento de las temperaturas (CAF, 2021); c) la alta dependencia de la importación de materiales de construcción y energía; y d) la limitada efectividad en la implementación de una matriz energética renovable, dado que el 99.48% de la electricidad proviene del diésel (INEC, 2023), son muestras de la presión que el sistema socioeconómico de Galápagos ejerce sobre su ecosistema en términos de escasez de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En este contexto, se vuelve crucial explorar estrategias que promuevan la eficiente optimización de los recursos. La construcción sostenible y la economía circular (EC) sugieren maximizar el aprovechamiento responsable y sostenible de estos recursos, en aras de fortalecer la resiliencia frente al cambio climático. Sus principios consideran aspectos como la eficiencia energética, el uso eficiente del agua, la mejora del ambiente interior y la relación con el entorno urbano y natural y la elección de materiales con baja huella ecológica que son indispensables a ser implementados en las islas (Valencia, 2018).

Esta investigación tiene como objetivo analizar los flujos biofísicos en el ciclo de vida de la producción de ecoladrillos en Galápagos para determinar su impacto sobre el ecosistema. Se analizaron las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), así como el consumo de materiales, agua y energía en cada etapa del proceso productivo. Al evaluar estos factores, se determinó varios indicadores de sostenibilidad sobre la producción de ecoladrillos en términos de eficiencia energética, huella hídrica y de emisión de carbono.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Economía circular en la construcción

La Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva de Ecuador (2021) define a la EC como un modelo que busca la regeneración y restauración de los ecosistemas mediante un cambio estratégico en la producción y el consumo (Asamblea Nacional, 2021). Mientras que, el Parlamento Europeo-PE (2023) establece que la EC se trata de un enfoque de producción y consumo que involucra prácticas como el compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes, con el propósito de generar valor agregado y, de esta manera, extender el ciclo de vida de los productos.

Específicamente en la industria de la construcción, el cambio hacia la circularidad requiere centrarse en el pensamiento sistémico para comprender todo el ciclo de vida de las infraestructuras y la cadena de valor de la construcción (Zimmann et al., 2016). Adoptar los principios de la EC y un diseño ecológico puede reducir significativamente el consumo de recursos y el impacto ambiental, promoviendo un uso más eficiente de los materiales de construcción (Munaro et al., 2020). En este contexto, un ejemplo destacado se encuentra en la isla de Bornholm, Dinamarca. Allí se llevó a cabo una investigación para explorar la creación de una cadena de valor basada en un sistema de producción y consumo de circuito cerrado. Durante este estudio, se realizaron pruebas y demostraciones de prácticas destinadas a reutilizar y reciclar residuos de construcción y demolición. Los resultados indicaron la viabilidad de casos comerciales positivos para la demolición selectiva, siempre y cuando se establezcan mercados locales para los materiales de construcción reutilizados (Christensen et al., 2022).

La EC en la construcción va más allá de la gestión de residuos e involucra toda la cadena de valor del proceso constructivo. Comienza en la etapa de planificación, considerando el espacio y las futuras circunstancias para asegurar la perdurabilidad

del proyecto. En el diseño se optimizan los materiales, se reduce la generación de residuos y se adoptan prácticas como la construcción modular y elementos industrializados. Además, se planifica la deconstrucción y se fomenta el uso de productos reutilizables o reciclables al final de su vida útil (Congreso Nacional de Medio Ambiente, 2018). Así, la construcción puede evolucionar de un enfoque convencional a uno alineado con principios sostenibles.

La EC se alinea con la construcción sostenible al aplicar sus principios para gestionar de manera eficiente recursos esenciales, como energía y agua, desde el diseño hasta el mantenimiento y rehabilitación de infraestructuras, utilizando además materiales sostenibles y reprocesados con baja huella ecológica. Esto conlleva beneficios como la eficiencia energética, la optimización del uso del agua, la prolongación de la vida útil de las infraestructuras, la reducción de costos operativos y la minimización de residuos. Además, esta perspectiva impulsa el desarrollo de bioemprendimientos, fortalece la resiliencia al cambio climático y fomenta la creación de regulaciones, contribuyendo a la construcción de infraestructuras más responsables y resilientes.

En Ecuador, se han logrado avances normativos que impulsan una construcción más eficiente en términos de consumo energético. Estos avances incluyen la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 2506:2009 sobre eficiencia energética en edificaciones y la NTE INEN 2507:2009 sobre rendimiento térmico de colectores solares. A partir de 2011, se desarrolló la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC), que establece parámetros mínimos de seguridad y calidad en las edificaciones, optimiza los mecanismos de control y mantenimiento en los procesos constructivos, entre otros, y en 2018 se publicó la normativa específica de eficiencia energética (MIDUVI, 2018). En 2019, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética fue promulgada, seguida en 2021

por su reglamento, que obliga a cumplir metas sectoriales de eficiencia energética y establece un proceso de evaluación del consumo energético para nuevas construcciones y remodelaciones (Asamblea Nacional, 2019). Estas normativas están alineadas con el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE) 2016-2035. Sin embargo, su aplicación aún no es efectiva en todo el territorio y no contempla la cuantificación de la huella de carbono en el ciclo de vida de las edificaciones.

2.2 Cuantificación de CO₂ en la construcción

Medir y reportar las emisiones de GEI de las edificaciones es fundamental para producir estrategias significativas y rentables. Aunque las metodologías de emisión de carbono varían entre países, el marco básico suele ser el proceso bien establecido del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El ACV suele considerar un enfoque “de la cuna a la cuna”, en el que los productos se evalúan sistemáticamente a lo largo de toda su vida. En los últimos años, ha existido un mayor interés en los métodos de ACV para evaluar edificaciones y productos con el fin de diseñarlos de manera eficiente y con materiales ambientalmente preferibles (Fenner, et al., 2018).

A nivel internacional, se han realizado múltiples investigaciones sobre el ACV en bloques y ladrillos. Un ejemplo notable es el estudio comparativo realizado en Egipto sobre las emisiones de carbono y la energía incorporada en ladrillos secados al sol versus ladrillos de arcilla cocida a través. Los resultados mostraron que, por cada 1,000 ladrillos cocidos producidos, la energía incorporada calculada es de 4,250 MJ y el carbono incorporado de 5,502 kg de CO_{2e}, mientras que, para los ladrillos secados al sol, solo se necesitan 0.033 MJ de energía incorporada y se emiten 0.24 kg de CO_{2e} (Dabaieh, et al., 2020).

Otra investigación en Argentina, realizada por Saez y Garzón (2020), analizó la huella de carbono en bloques elaborados con polipropileno post-consumo. La metodología utilizada fue la propuesta por las Normas IRAM-ISO 14040 y IRAM-ISO 14044, que se enfocan en el ACV.

Los resultados indicaron que la fabricación de un metro cuadrado del prototipo en estudio genera 11.37 kg CO_{2e}.

En Ecuador, la investigación de Villota (2023) calculó la huella de carbono de la fabricación de ladrillos artesanales en la parroquia Sinincay, Cuenca, utilizando la norma UNE-EN ISO 14064-1:2019. Los resultados mostraron que las emisiones directas e indirectas en la producción anual de 360,000 ladrillos artesanales fueron de 72.74 toneladas de CO_{2e}.

En Galápagos, aún no se han realizado estudios sobre la cuantificación de carbono en el sector de la construcción o los materiales de construcción. No obstante, se han encontrado otros estudios relevantes. Por ejemplo, en la isla Santa Cruz, el proyecto Huella de Ciudades calculó la huella de carbono. En la ciudad de Puerto Ayora, se estableció la línea de base de las huellas de carbono e hídrica para el año 2015. Las emisiones totales de GEI fueron de 45,353 toneladas de CO_{2e}, representando aproximadamente el 0.01% de las emisiones totales de Ecuador en 2011 reportadas en su Segunda Comunicación sobre Cambio Climático en 2011 (CAF, 2017).

El Plan Galápagos 2030, emitido en 2021, promueve la construcción sostenible y ambientalmente amigable, adaptada al contexto insular de las islas. Entre sus metas principales se incluyen la descarbonización de Galápagos y la reducción del 20% en la huella de carbono y el consumo de agua en los asentamientos humanos y las principales

actividades económicas. Además, como objetivo estratégico, propone identificar oportunidades para disminuir el uso de combustibles fósiles en el transporte marítimo y el sector hotelero, mediante la implementación de estándares y normas de eficiencia energética (CGREG, 2021). Para apoyar sus metas y objetivos, es crucial realizar estudios sobre las emisiones de CO₂ en el sector de la construcción en Galápagos. Estos estudios son necesarios para comprender el impacto real de la construcción y proporcionar información valiosa para los tomadores de decisiones.

En Galápagos, se ha comenzado a producir y utilizar bloques y ladrillos ecológicos como parte de un esfuerzo por emplear materiales más sostenibles y locales. Diversos estudios han explorado el potencial de estos bloques ecológicos para el aislamiento de edificaciones y han demostrado que ofrecen un rendimiento energético superior al de los bloques convencionales (Prato & Schiavi, 2015).

Un estudio realizado en la isla de Mauricio destaca los beneficios de los bloques ecológicos en la mejora del confort térmico de los edificios. Joyram, Govindan y Nunkoo (2024) informan que la tecnología de bloques ecológicos se introdujo para reducir el consumo de energía necesario para enfriar los espacios, especialmente durante el verano, cuando las temperaturas superan los 35 °C. En otro estudio de 2015, The United Basalt Products Ltd evaluó el desempeño energético de dos edificios similares en Mauricio: uno construido con bloques convencionales y el otro con ecobloques. Los resultados demostraron que los ecobloques son tres veces más eficientes en

términos de resistencia térmica. Además, el edificio con ecobloques requirió significativamente menos electricidad para enfriar el espacio en comparación con el edificio de bloques convencionales (Joyram, Govindan, & Nunkoo, 2022).

En Argentina, González (2014) documentó la fabricación de bloques de paja y arcilla para rellenar paredes envolventes en la Patagonia Andina. La energía incorporada y las emisiones de CO₂ fueron de 40 MJ y 3.4 kg CO_{2e} por metro cuadrado de pared cubierta con bloques de paja y arcilla, respectivamente. Estas cifras son considerablemente menores en comparación con las de los ladrillos cocidos comunes (481 MJ/m² de pared y 38 kg CO_{2e}/m² de pared) y los bloques de hormigón (141 MJ/m² de pared y 11 kg CO_{2e}/m² de pared).

Por lo tanto, los bloques y ladrillos ecológicos se han consolidado internacionalmente como una alternativa atractiva frente a los bloques de hormigón convencionales, gracias a su capacidad para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones y su menor impacto ambiental en la fabricación. Se presume que el uso de reciclados, disminuirían la intensidad energética y sus emisiones de CO₂, sin embargo, la presencia de energía y materiales imprevistos en los procesos específicos de su producción, la tecnología y la localización pueden impactar en la sostenibilidad a largo plazo.

15

3. METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología del ACV para identificar el proceso de producción de los ecoladrillos en Galápagos. El alcance abarcó desde el transporte de materiales a las islas hasta el apilado y secado del producto final, incluyendo las emisiones y el consumo de energía relacionados con productos fabricados, como el cemento. La información obtenida fue mediante un enfoque bottom up, para lo cual se estructuró un diagrama input-output

de flujos biofísicos, considerando las entradas de flujos: energía (electricidad y combustibles), actividad humana, materiales, agua y las salidas de flujos: emisiones de CO_{2e} y residuos sólidos (Gráfico 1). Además, se identificaron los materiales y emisiones propios de las islas y los provenientes del continente.

Gráfico 1. Propuesta de ACV del proceso productivo



Fuente: Elaboración propia

16

Para estimar las emisiones de CO₂e, se aplicaron los principios del Protocolo de GHG, los factores de emisión del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2006 y factores propios del Sistema Nacional Interconectado (SNI), para las emisiones, además del análisis de las tasas de retorno energético determinadas para cada subproceso.

Finalmente, se identificaron las variables intensivas, que se refieren a la cantidad de recursos asociados con la producción de un solo ecoladrillo, como la energía consumida (Joules/ecoladrillo), materiales necesarios (m³/ecoladrillo), el consumo de agua (m³/ecoladrillo) y el trabajo realizado (horas-trabajo/ecoladrillo). Las variables intensivas son útiles para estimar los posibles impactos ecosistémicos en las islas, ya que pueden convertirse en variables extensivas. Las variables extensivas, por su parte, reflejan el total de recursos asociados con la producción completa de los ecoladrillos, como el total de energía consumida, el volumen total de agua y materiales utilizados y las horas de trabajo empleadas.

La población y muestra del estudio comprende los proveedores de mampostería ecológica disponibles en las islas Galápagos. Se identificaron dos iniciativas en Santa Cruz dedicadas a la producción de mampostería ecológica: la constructora Garden House Design (GHD) y ReciclArte. Por lo tanto, se decidió aplicar un muestreo no probabilístico por conveniencia, dada la escasez de proveedores en las islas. La

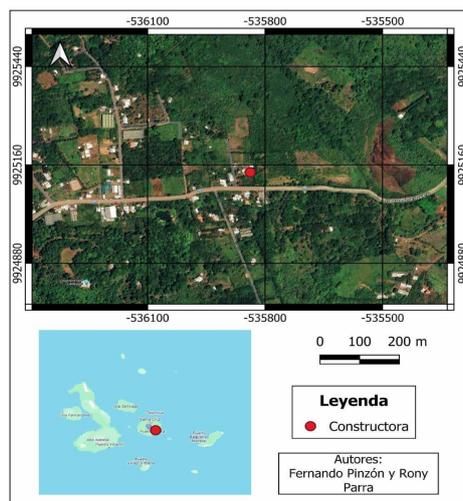
constructora GHD fue seleccionada como objeto de estudio, dado que actualmente se dedica a la producción de ecoladrillos y cuenta con la maquinaria necesaria.

Se trabajó con información secundaria de diversas fuentes bibliográficas y estadísticas para complementar las brechas de datos, especialmente en lo referente al consumo de combustible desde continente hacia las islas, así como emisiones y energía incorporada del cemento. Además, se aplicaron los factores de emisión del IPCC y factores propios del SNI.

Adicionalmente, se diseñó y se levantó un cuestionario semiestructurado de entrevista in situ en el mes de marzo de 2024 que incluyó preguntas abiertas realizada a actores estratégicos presentes en los subprocesos del sistema de producción para recabar información primaria sobre los flujos biofísicos.

La constructora GHD está ubicada en Santa Cruz, El Cascajo, vía a la playa El Garrapatero (Figura 1), produce ecoladrillos a partir de vidrio reciclado y utiliza maquinaria eléctrica únicamente para dos procesos (prensado y la limpieza). Está equipada con diferentes moldes de hierro intercambiables y de tamaño variable, que permiten fabricar ecoladrillos según las dimensiones requeridas del producto final. En noviembre de 2022, alcanzaron su mayor producción con 16,800 ecoladrillos, cifra que se tomó como referencia para el estudio.

Figura 1. Ubicación del estudio



Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Alcance de emisiones y energía incorporada

De acuerdo con los principios del Protocolo GHG realizado por (WRI, WBCSD, & SEMARNAT, 2005), las emisiones del estudio corresponden al Alcance 2 (emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad), debido al uso de dos maquinarias para el proceso de prensado y limpieza.

El estudio también abarca el Alcance 3 (otras emisiones indirectas), que incluye las emisiones resultantes de las actividades de la empresa, pero que provienen de fuentes que no son de su propiedad ni están bajo su control. Dentro de este alcance, se identificaron dos fuentes principales: a) las emisiones asociadas al consumo de combustible para el transporte de materiales y el combustible utilizado para generar electricidad en las islas, y b) las emisiones asociadas a la producción de cemento.

En cuanto al transporte de materiales para la producción de los 16,800 ecoladrillos, el tiempo estimado de viaje desde Guayaquil hasta Santa Cruz es de 5 días (MTOPI, 2021). Según la ficha técnica del buque Fusion 2, que opera en esta ruta, el consumo estimado de combustible es de 2,966 galones de diésel oil por día. Esto

equivale a un total de 14,830 galones de diésel consumidos en los 5 días de viaje. El buque tiene una capacidad máxima de 373 contenedores de 20 pies y un tonelaje neto de 2,052.33 toneladas (Pacific Cargo Line, 2020). Por lo tanto, transportar una carga de 144 quintales de cemento de 50 kg (7.2 toneladas) requeriría 52.03 galones de diésel.

Para calcular el consumo de combustible en el transporte de diésel y gasolina de Guayaquil a Santa Cruz, se tomó como referencia el buque ALFA 007, que transporta 10,000 barriles de diésel (420,000 galones) y 5,000 barriles de gasolina (210,000 galones), y tarda dos días en llegar a Santa Cruz (CGREG, 2019). Según la ficha técnica del buque, tiene un consumo diario de 3,170 galones de diésel oil (Consulat, 2014), por lo que consumiría 6,340 galones de diésel en los dos días. Por lo tanto, transportar 34 galones de gasolina necesarios para transportar los materiales al interior de Santa Cruz requiere 0.342 galones de diésel. Asimismo, se requieren 17.28 galones de diésel para la generación de electricidad del proceso productivo, y su transporte desde Guayaquil requeriría 0.1739 galones de diésel.

En referencia a las emisiones del cemento, investigaciones internacionales informan que la producción de 1 tonelada de cemento Portland produce aproximadamente 900 kg de emisiones de CO₂ (Dey, et al., 2023; Benhelal, et al., 2013). Sin embargo, en la memoria de sostenibilidad de Holcim Ecuador 2019/2020, informan que la intensidad de emisiones es 552 kg CO₂ neto por tonelada material cementante (Holcim, 2021). Se va a tomar como referencia este último valor, dado que es una empresa que opera en el país. Por lo tanto, un quintal de cemento de 50 kg emite alrededor de 27.6 kg de CO_{2e}, y los 144 quintales de cemento necesarios para producir los 16,800 ecoladrillos generarían 3,974.40 kg de CO_{2e}.

En cuanto a la energía necesaria para el proceso productivo, según la investigación de (León & Guillén, 2020), la energía incorporada en la producción de una tonelada de cemento es de 3,191.95 MJ. Los principales aportes de energía provienen del uso de caliza, fuel oil y electricidad. Por lo tanto, para producir 16,800 ecoladrillos, que requieren 7.2 toneladas de cemento, se necesitarían 0.02298 TJ de energía.

De esta manera, considerando el consumo de combustibles y energía en la producción de 16,800 ecoladrillos, se requiere un total de 0.0369 TJ (Tabla 1).

Tabla 1. Energía incorporada por proceso y material

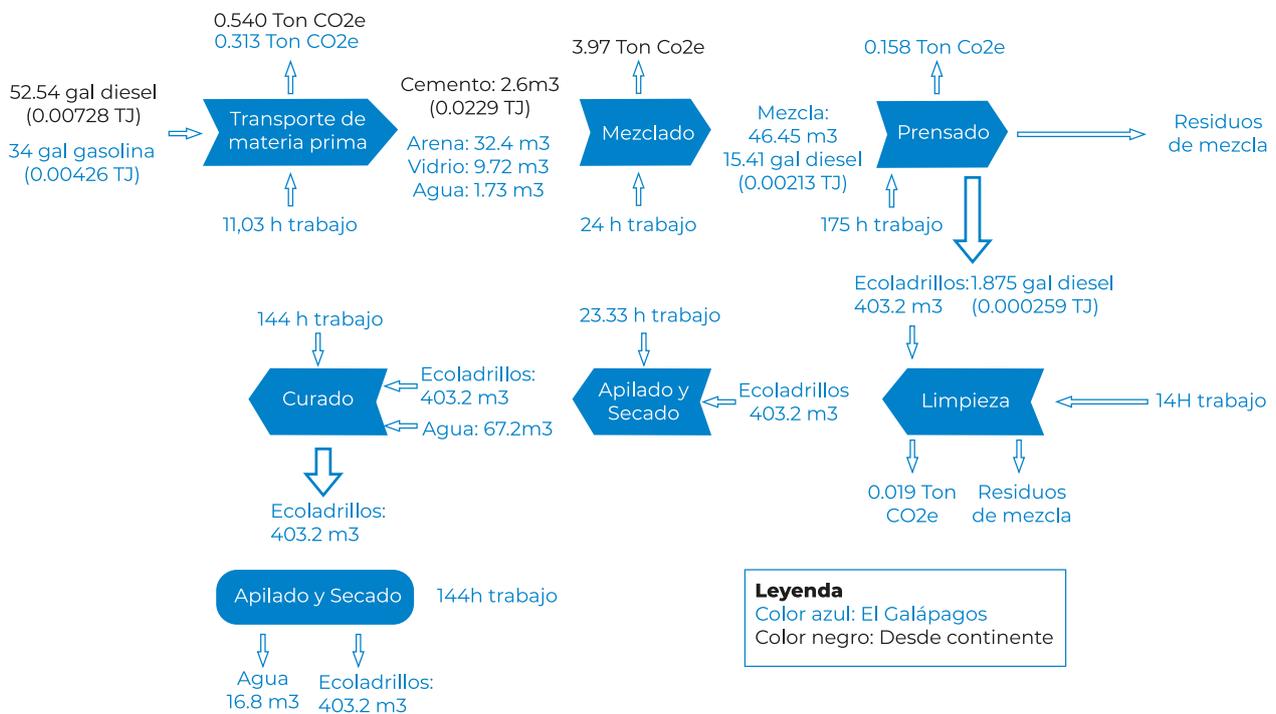
Actividad/Producto	Combustible necesario	Energía (TJ)	%
Prensado	15.41 galones de diésel	0.0021354	5.8%
Limpieza	1.875 galones de diésel	0.0002598	0.7%
Transporte de materia prima (arena, cemento y vidrio) dentro de Santa Cruz	34 galones de gasolina	0.0042662	11.6%
Transporte de cemento desde Guayaquil	52.03 galones de diésel	0.0072099	19.5%
Transporte de gasolina desde Guayaquil para la movilización de la camioneta dentro de Santa Cruz	0.342 galones de diésel	0.0000474	0.1%
Transporte del diésel desde Guayaquil para generación de electricidad	0.1739 galones de diésel	0.0000241	0.1%
Incorporado en el cemento		0.02298	62.2%
Total		0.036923	100%

4.2 Análisis del Ciclo de Vida

El ACV (Gráfico 2) reveló que la producción de 16,800 ecoladrillos genera emisiones indirectas de 5 toneladas de CO₂e. Esto implica que la

producción de cada ecoladrillo con dimensiones de 12cmx8cmx25cm (2,400 cm³) emite 0.297 kg de CO₂e.

Gráfico 2. Visualización del ciclo de vida de la producción de ecoladrillos (2022)



Fuente: Elaboración propia con datos de GHD (2024)

Las emisiones indirectas relacionadas con el cemento constituyen el 79.40% de las emisiones totales y además contiene el 62.2% de la energía incorporada del ecoladrillo, es un dato relevante dado que son emisiones y energía contabilizada desde continente y que frecuentemente son obviadas en los análisis tradicionales. Mientras que la etapa de transporte de materiales, con un 17.05%, es la segunda mayor generadora

de emisiones y contiene el 31.1% de la energía incorporada. Por otro lado, las emisiones indirectas relacionadas con la electricidad representan tan solo el 3.55% y contienen el 6.5% de energía incorporada, es mínimo, ya que gran parte del proceso es artesanal y se realiza manualmente.

En cuanto a los materiales, la producción de ecoladrillos se basa principalmente en agua, que

representa el 60.65% del total, seguido de arena con el 28.52% y polvo de vidrio con el 8.55%. Caso contrario, el cemento constituye solo el 2.29% de los materiales utilizados.

A partir de ACV se calcularon variables intensivas y extensivas (Tabla 2). Las variables intensivas se obtuvieron dividiendo las variables extensivas entre el total de 16,800 ecoladrillos producidos. Con estos datos, se pueden estimar fácilmente los requerimientos futuros de materiales si la demanda de ecoladrillos aumenta en las islas (Autor, Bukkens, & Giampietro, 2020; Autor, Di Felice, Giampietro, & Ramos, 2018). Estos valores son importantes para discutir los posibles

impactos sobre el ecosistema, dado que en Galápagos existe escasez de arena, energía y agua (Galapagos Conservation Trust, 2015).

Tabla 2. Variables intensivas y extensivas

Tipo	Variable intensiva	Variable extensiva
Cemento	0.0001548 m ³ /ecoladrillo	2.6 m ³
Arena	0.0019286 m ³ /ecoladrillo	32.4 m ³
Agua	0.0041030 m ³ /ecoladrillo	68.93 m ³
Polvo de vidrio	0.0005786 m ³ /ecoladrillo	9.72 m ³
Trabajo	0.0318667 horas trabajo/ecoladrillo	535.36 horas trabajo
Energía	0.0000022 TJ/ecoladrillo	0.0369 TJ
Emisiones de CO ₂ e	0.0002976 Ton CO ₂ e/ecoladrillo	5 ton CO ₂ e

Fuente: Elaboración propia con datos de GHD (2024)

Por otro lado, una jornada laboral estándar en Ecuador comprende 160 horas al mes. La variable de trabajo muestra que la producción de ecoladrillos requiere de 3.34 personas al mes para mantener ese ritmo de producción. No obstante, se ha determinado que la capacidad de producción de ecoladrillos podría aumentar considerablemente según la demanda, lo cual incrementaría la necesidad de mano de obra y, en consecuencia, fomentaría el empleo en las islas.

De acuerdo con GADM Santa Cruz (2009), en 2009 la mina Granillo Rojo tenía un volumen de 1,908,698 m³ de material y la tasa de extracción de la mina es de 81,206.63 m³ (DPNG, 2013). Lo que indicaría que para 2023 su volumen se reduciría a

771,805.18 m³. Si se mantiene la misma tasa de extracción los recursos se acabarían en 9.5 años.

Para comparar los resultados, se utilizaron los hallazgos de la investigación de (Urgilés & Vanessa, 2017), quienes elaboraron el Inventario del Ciclo de Vida de un bloque de hormigón convencional en la ciudad de Cuenca. Este estudio fue seleccionado porque también consideró tanto la energía incorporada como las emisiones de CO₂ asociadas al cemento. Según su investigación, la energía incorporada y las emisiones de CO₂ para un bloque de 10cmx20cmx40cm (8,000 cm³) son de 8.34 MJ por bloque y 0.83 kg de CO₂ por bloque.

En el presente estudio, se evaluó un ecoladrillo de 12cmx8cmx25cm (2,400 cm³) y se obtuvieron valores de 2.2 MJ por ecoladrillo y 0.297 kg de CO₂/ecoladrillo. Si se ajustaran las dimensiones del ecoladrillo para que tuviera el mismo volumen que el bloque de hormigón (8,000 cm³), el ecoladrillo emitiría 7.3 MJ y 0.97 kg de CO₂ por unidad. Esto significa que, en comparación con el bloque de hormigón, la energía incorporada en el ecoladrillo se reduciría en un 12.5%, pero las emisiones de CO₂ aumentarían en un 16.8%.

El uso de vidrio reciclado en lugar de otros materiales probablemente redujo la energía incorporada en la fabricación del ecoladrillo. Los materiales reciclados suelen requerir menos energía para un nuevo procesamiento, dado que ya tienen un proceso productivo detrás de ellos, a diferencia de los materiales vírgenes utilizados en la fabricación de bloques de hormigón. Sin

embargo, este ahorro de energía no se tradujo en una reducción de las emisiones de CO₂; de hecho, estas aumentaron un 16.8%. Este incremento se debe a factores como el transporte de materiales desde continente y el uso de combustibles fósiles para generar la electricidad necesaria para la producción de los ecoladrillos.

5. CONCLUSIONES

La metodología empleada permitió identificar datos frecuentemente omitidos en los análisis tradicionales, como las emisiones y el consumo de energía asociados al transporte de materiales, así como las emisiones y la energía incorporada en un material. Los resultados revelaron que, aunque el cemento representa solo el 2.29% de los materiales utilizados, es responsable del 79.40% de las emisiones totales y del 62.2% de la energía incorporada. Esto refleja el extenso proceso productivo detrás de este material y resalta la urgencia de encontrar alternativas más sostenibles.

En Galápagos se están adoptando prácticas de EC en la construcción, como la producción de ecoladrillos a partir de vidrio reciclado. Esta iniciativa promueve el reciclaje de vidrio a través de la recolección voluntaria y la limpieza costera. El vidrio recolectado se transforma en polvo, extendiendo su vida útil como materia prima para otros procesos productivos, cumpliendo así con los principios del ciclo técnico del diagrama de mariposa de la EC. Además, se ha identificado en las islas la adopción de prácticas sostenibles,

como la reutilización del agua de lluvia y la reutilización de los desechos.

Dado que las nuevas construcciones representarán solo el 5% del parque edificado futuro (Euroclima y Mentefactura, 2020), se concluye que el verdadero impacto de los ecoladrillos se podría lograr al implementarlos en la remodelación de las 9,627 viviendas, para mejorar su eficiencia energética. Además, deberían ser una prioridad en las nuevas construcciones y futuros proyectos inmobiliarios de las islas, lo que contribuiría a cumplir la meta clave del Plan Galápagos 2030 de reducir la huella de carbono y agua de los asentamientos humanos.

El estudio evidencia que por cada ecoladrillo fabricado se emiten 0.297 kg de CO₂e. Además, muestra la necesidad de materiales y recursos: se requieren 0.0019286 m³ de arena, 0.0001548 m³ de cemento, 0.0041030 m³ de agua, 0.0000022 TJ de energía y 0.032 horas de trabajo. La demanda de estos materiales puede tener impactos en el ecosistema sensible de Galápagos, como el agotamiento de las minas y

el agua, que es escasa en Santa Cruz y se destina al proceso de producción en lugar de al consumo humano. También existe la posibilidad de que, en el futuro, los materiales reciclados, como el vidrio, no cubran la demanda, lo que obligaría a importar desde continente.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Mentefactura, a través del proyecto Living Lab de Edificación Sostenible, a la Fundación Vive World in Cooperation (VWC) y a la constructora GHD

por facilitar el levantamiento de la información necesaria y por el respaldo brindado durante la investigación.

7. REFERENCIAS

Asamblea Nacional. (2019). Ley Orgánica de Eficiencia Energética. Quito: Lexis.

Asamblea Nacional. (2021). Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva. Quito: Registro Oficial Suplemento No. 488.

Autor, Bukkens, S., & Giampietro, M. (2020). Exploration of the environmental implications of ageing conventional oil reserves with relational analysis. Elsevier: Science of The Total Environment.

Autor, Di Felice, L., Giampietro, M., & Ramos, J. (2018). The metabolism of oil extraction: A bottom-up approach applied to the case of Ecuador. Elsevier: Energy Policy, 63-74.

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. Elsevier: Journal of Cleaner Production, 142-161.

CAF. (2017). La isla Santa Cruz, Ecuador, calculó su huella de carbono para impulsar un crecimiento bajo en emisiones. Obtenido de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2017/04/santa-cruz-medira-su-huella-de-carbono-para-impulsar-un-crecimiento-bajo-en-emisiones/>

CAF. (2021). Climate Change: The New Evolutionary Challenge for the Galapagos. Green Climate Found.

CCQ. (2023). La construcción y operación genera el 38% de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Obtenido de <https://ccq.ec/la-construccion-y-operacion-genera-el-38-de-gases-de-efecto-invernadero-a-nivel-mundial/>

CENACE. (2020). Factor de emisión del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador.

CGREG. (2019). Buque ALFA 007 reemplaza temporalmente al barco Isla Puná. Obtenido de <https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/buque-alfa-007-reemplaza-temporalmente-al-barco-isla-puna/>

CGREG. (2021). Plan de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Régimen Especial de Galápagos 2030. Puerto Baquerizo Moreno, Galápagos, Ecuador.

Christensen, T., Johansen, M., Buchard, M., & Glarborg, C. (2022). Closing the material loops for construction and

demolition waste: The circular economy on the island Bornholm, Denmark. *Resources, Conservation & Recycling Advances*.

Congreso Nacional de Medio Ambiente. (2018). *Economía Circular en el sector de la construcción*. Madrid.

Consulat. (2014). *Estudio de Impacto Ambiental Expost y Plan de Manejo de la Operación del Buque Tanque Alfa 007 en los segmentos naviero nacional, internacional e industrial con recorrido en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas y El Oro*. Guayaquil.

Dabaieh, M., Heinonen, J., El Mahdy, D., & Maguid, D. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. Elsevier: *Journal of Cleaner Production*.

Dey, A., Rumman, R., Wakjira, T., Jindal, A., Bediwy, A., Islam, M., . . . Sabouni, R. (2023). Towards net-zero emission: A case study investigating sustainability potential of geopolymer concrete with recycled glass powder and gold mine tailings. Elsevier: *Journal of Building Engineering*.

DPNG. (2013). *Control y Registro de Movilización de Recursos Pétreos*. Obtenido de https://galapagos.gob.ec/control_y_registro_movilizacion_recursos_petreos/

Euroclima y Mentefactura. (2020). ProDoc del proyecto “Living Lab de edificación sostenible” implementado en el archipiélago de Galápagos. Galápagos.

Fenner, A., Kibert, C., Woo, J., Morque, S., Razkenari, M., Hakim, H., & Lü, X. (2018). The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. Elsevier: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1142-1152.

FFLA. (2023). *Presentación de resultados del Proyecto CEELA en Ecuador para la Ecuador Green Building Week*. Cuenca.

GADM Santa Cruz. (2009). *Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Cantón Santa Cruz 2012 - 2027*. Santa Cruz.

Galapagos Conservation Trust. (2015). *Energía Renovable y Construcción Sostenible*. Recuperado el 2024, de <http://blog.discoveringgalapagos.org.uk/es/energia-renovable-constuccion-sostenible/>

González. (2014). Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced. Elsevier: *Energy and Buildings*, 15-22.

Holcim. (2021). *Memoria de sostenibilidad 2019/2020*.

INEC. (2015). *Tabulados del Censo de Población y Vivienda – Galápagos 2015*. Galápagos.

INEC. (2023). *Censo Ecuador 2022 tabulados: Condiciones generales de las viviendas*.

Islam, M., Noaman, M., Islam, K., & Hanif, M. (2024). Mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete with raw fly ash as a partial replacement of cement. *Heliyon*, 10.

Joyram, H., Govindan, K., & Nunkoo, R. (2022). A comprehensive review on the adoption of insulated block/eco-block as a green building technology from a resident perspective. *Cleaner Engineering and Technology*.

Joyram, H., Govindan, K., & Nunkoo, R. (2024). Development of a novel psychological model to predict the eco-block building adoption in Mauritius. *Cleaner and Responsible Consumption*.

León, A., & Guillén, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. Scielo Brasil.

MIDUVI. (2018). Norma Ecuatoriana de Construcción: Eficiencia energética en edificaciones residenciales (EE). Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

MTOP. (2021). Itinerario de Transporte Marítimo de carga hacia Galápagos. Obtenido de https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/11/2022-10-25_Of_Nro_MTOP-SPTM-22-714-OFSCY-SCX.pdf

Munaro, M., Tavares, S., & Bragança, L. (2020). Towards circular and more sustainable buildings: A systematic literature review on the circular economy in the built environment. Elsevier: Journal of Cleaner Production.

Pacific Cargo Line. (2020). Estudio de Impacto Ambiental Expost y Plan de Manejo Ambiental Del Proyecto Operación del Buque de Carga Fusion 2 desde el muelle Storocean y Caraguay (Guayaquil), hacia las Islas Galápagos, Santa Cruz-San Cristóbal. Galápagos.

Parlamento Europeo. (2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios.

Prato, A., & Schiavi, A. (2015). Sound insulation of building elements at low frequency: a modal approach. ScienceDirect: Energy Procedia, 128 – 133.

Saez, V., & Garzón, B. (2020). Análisis de la huella de carbono en bloques resuelto conpolipropileno post-consumo. Arquitecto, 47-55.

Urgilés, D., & Vanessa, G. (2017). Inventario del ciclo de vida para la determinación de la energía incorporada y las emisiones de CO2 en el proceso de elaboración del bloque en una fábrica de Cuenca – Ecuador . Universidad de Cuenca.

Valencia, D. (2018). La vivienda sostenible, desde un enfoque teórico y de política pública en Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 40-56.

Villota, D. (2023). Cálculo de la Huella de Carbono para la fabricación de ladrillos artesanales en la parroquia Sinicay, Cuenca Ecuador. Cuenca: Universidad Internacional de la Rioja.

WRI, WBCSD, & SEMARNAT. (2005). Protocolo de Gases de Efecto Invernadero: Estándar corporativo de contabilidad y reporte. México.

Zimmann, R., O'Brien, H., Hargrave, J., & Morrell, M. (2016). The Circular Economy in the Built Environment. London: ARUP.