Revista Ciencia UNEMI
Vol. 18, N° 48, Mayo-Agosto 2025, pp. 39 - 49
ISSN 1390-4272 Impreso
ISSN 2528-7737 Electrónico
https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol18iss48.2025pp39-49p

Ciclo de vida del cacao con economía circular en la Amazonía ecuatoriana

Rolando Marcel Torres Castillo[1]; Juan Carlos Bustamante Cuenca[2]; Leonardo Daniel Cabezas Andrade[3]; Rolando Fabián Zabala Vizuete[4]; Cristina Yajaira Zurita Quishpe[5]; Jerick Kleynner Ochoa Cordero[6]; Marco Omar Vizuete Montero[7*]

Resumen

El cacao es uno de los cultivos más importantes en Ecuador, especialmente en la Amazonía, sin embargo, su producción genera diversos impactos ambientales y sociales, principalmente relacionados con la gestión inadecuada de residuos. Este estudio analizó el impacto ambiental de las plantaciones de cacao mediante una evaluación del ciclo de vida (ACV) con un enfoque en la economía circular, tomando como caso de estudio el cantón Loreto, provincia de Orellana. El análisis se realizó utilizando la herramienta GaBi, aplicando el método TRACI 2.1 para identificar los principales impactos ambientales desde el transporte de plantas hasta la venta del producto final. Los resultados revelaron que las emisiones de CO_2 (228 kg), SO_2 (0.00462 kg) y N (0.00128 kg) están principalmente asociadas al uso de diesel en el transporte. Se identificaron impactos significativos sobre el agua, el aire y el suelo durante las etapas de riego, abono y fertilización, así como pérdida de biodiversidad causada por el uso intensivo de insumos químicos. En conclusión, la revalorización de subproductos del cacao bajo un enfoque de economía circular, junto con la implementación de estrategias sostenibles en la gestión de insumos, puede mitigar los impactos negativos y promover una producción más sostenible.

Palabras clave: Cultivo tropical, gestión de residuos, producción agrícola, revalorización de subproductos, sostenibilidad ambiental.

Life cycle of cocoa with a circular economy focus in the Ecuadorian Amazon

Abstract

The cacao crop is one of the most important in Ecuador, particularly in the Amazon region; however, its production generates various environmental and social impacts, mainly related to inadequate waste management. This study analyzed the environmental impact of cacao plantations through a Life Cycle Assessment (LCA) with a circular economy approach, using Loreto Canton, Orellana Province, as a case study. The analysis was conducted using the GaBi software, applying the TRACI 2.1 method to identify the main environmental impacts from plant transportation to the final product sale. The results revealed that CO2 (228 kg), SO2 (0.00462 kg), and N (0.00128 kg) emissions were primarily associated with diesel use during transportation. Significant impacts on water, air, and soil were identified during irrigation, fertilization, and soil preparation stages, as well as biodiversity loss caused by intensive use of chemical inputs. In conclusion, the valorization of cacao by-products under a circular economy approach, along with the implementation of sustainable input management strategies, can mitigate negative impacts and promote more sustainable production.

Keywords: Tropical crop, waste management, agricultural production, by-product valorization, environmental sustainability.

Recibido: 12 de febrero de 2025
Aceptado: 25 de abril de 2025

[1] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0000-0002-0096-2897, rolando.torres@espoch.edu.ec,

[2] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0009-0003-7168-0787, juan.bustamante@espoch.edu.ec,

[3] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0000-0001-5056-9180, leonardod.cabezas@espoch.edu.ec,

[4] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0000-0001-7541-4441, rzabala@espoch.edu.ec,

[5] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0009-0006-3628-1299, cristina_yajaira102000@outlook.com,

[6] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0009-0006-3536-7576, jeryckkleynner98@hotmail.com,

[7] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Sede Orellana), https://orcid.org/0000-0001-8272-419X, marco.vizuete@espoch.edu.ec,

[*]Autor para correspondencia: Marco Vizuete-Montero: marco.vizuete@espoch.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

El cacao es uno de los cultivos más relevantes para la economía de varios países, especialmente en Ecuador, donde se lo considera un producto emblemático. Este país fue reconocido como el mayor productor mundial de cacao fino de aroma a finales del siglo XIX, destacándose por la calidad de su producción (Alcívar-Córdova et al., 2021). En la actualidad, las provincias amazónicas de Ecuador han incrementado significativamente su superficie cultivada, pasando de 8,090 ha en 2001 a 30,764 ha en 2018, lo que ha generado empleo y oportunidades económicas para estas regiones (Viteri et al., 2018).

Sin embargo, la producción de cacao también plantea desafíos ambientales importantes, particularmente en lo que respecta a la gestión de residuos. Entre los subproductos generados, la cascarilla y la cáscara de mazorca representan una fuente significativa de desechos, cuya acumulación y gestión inadecuada pueden causar problemas como degradación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero y proliferación de vectores de enfermedades (Salazar-Camacho et al., 2024). Además, la expansión de las plantaciones de cacao puede contribuir a la pérdida de biodiversidad y a la degradación de bosques naturales (Maney et al., 2022).

Frente a este panorama, surge la necesidad de evaluar el ciclo de vida de la producción de cacao como una herramienta clave para comprender los impactos ambientales asociados y para promover prácticas sostenibles. Este análisis permite identificar oportunidades de mejora, optimizar la gestión de residuos y fomentar la revalorización de subproductos como la cascarilla, la cual puede ser utilizada en aplicaciones industriales y medicinales, contribuyendo a una economía circular (Ronie et al., 2024). En este contexto, la aplicación de un enfoque de economía circular puede transformar los residuos de cacao en recursos valiosos, promoviendo la sostenibilidad económica y ambiental de esta actividad.

Este artículo tiene como objetivo analizar el impacto ambiental de las plantaciones de cacao mediante una evaluación del ciclo de vida, con un enfoque en la gestión de residuos bajo principios de economía circular en el cantón Loreto, provincia de Orellana, una de las principales zonas productoras de cacao en Ecuador.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Orellana, la cual está situada en el nororiente de Ecuador, limita al norte con Sucumbíos, al este con Perú, al sur con la provincia de Pastaza y al Oeste con Napo. Orellana tiene una superficie de 21,599.11 km² (GADPO, 2020). Dentro de esta provincia se ubica el cantón Loreto, donde se encuentra la Finca Real en la que se llevó a cabo la investigación.

Análisis del ciclo de vida del cacao

Se utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Saavedra & Vargas, 2000) para describir los impactos ambientales del cultivo de cacao según las normas NTC-ISO 14040 y NTC ISO 14044. Para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida del cultivo de cacao se utilizó el software GaBi, donde se realizaron los siguientes pasos acorde a la guía de la Sociedad Pública de Gestión Ambiental Basque Ecodesign Center (IHOBE, 2017).

1) Inicio y configuración: Para utilizar el software GaBi, primero se necesitó un computador compatible con la aplicación. Se configuró las preferencias del usuario, como el idioma y las unidades de medida, para asegurarse de que los resultados fueran comprensibles y relevantes.

2) Creación del proyecto: Una vez iniciado el software, se creó un nuevo proyecto de análisis del ciclo de vida. Se ingresaron los detalles del proceso de cultivo de cacao y se definieron los objetivos y el alcance del análisis.

3) Selección de inventarios: Se accedió a la base de datos de inventario de ciclo de vida de GaBi. En esta etapa, se eligieron los materiales, procesos y actividades relevantes para el análisis. Se buscaron y seleccionaron los datos específicos necesarios para modelar el ciclo de vida del proceso en cuestión.

4) Modelado del ciclo de vida: Se procedió a crear un modelo detallado del ciclo de vida utilizando los datos de inventario seleccionados. Esto involucró la construcción de una representación gráfica y numérica del flujo de materias y energía a lo largo

de todas las etapas, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.

5) Asignación de datos y parámetros: Se asignaron los datos de inventario a las etapas correspondientes del modelo. Esto incluyó la entrada de consumos de recursos, emisiones y otros indicadores de impacto ambiental. Además, se ajustaron los parámetros del modelo según fuera necesario para reflejar con precisión la realidad.

6) Análisis de impacto ambiental: Se seleccionaron los métodos de evaluación de impacto ambiental que mejor se adecuaron a los objetivos del estudio. Estos métodos cuantificaron y evaluaron los impactos ambientales y de sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida.

7) Resultados y reportes: Una vez completado el análisis, se generaron informes y gráficos que resumieron los resultados obtenidos. Estos informes comunicaron los impactos ambientales, el rendimiento de sostenibilidad y otras métricas relevantes de manera clara y comprensible.

Impactos generados por el cultivo de cacao

Para determinar los impactos generados por el cultivo de cacao, se usó la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental por Indicadores (Perevochtchikova, 2013), el cual es un enfoque sistemático que se utiliza para evaluar y cuantificar los efectos potenciales que un proyecto, actividad o política puede tener sobre el medio ambiente. En este caso, se basó en un enfoque cualitativo de los impactos asociados al ciclo de vida del cacao, para ello se elaboró un checklist que se puede encontrar en el Apéndice A.

III. RESULTADOS

En la Fig. 1 se presenta el flujo de procesos establecido para el Ciclo de Vida del cacao de la plantación de la Finca Real, el proceso corresponde al cultivo de 1875 plantas sembradas en 3 ha. El proceso de este ciclo empieza desde el transporte de las plantas desde el lugar de la compra hasta las inmediaciones de la finca, luego se procede a la siembra de los clones para la plantación de cacao, después se realiza el mantenimiento, posterior cosecha, para luego el producto cosechado ser fermentado, puesto a secar para eliminar su exceso de humedad, poder almacenarlo para, finalmente, ser transportado al centro de acopio para su posterior conversión en un nuevo producto.

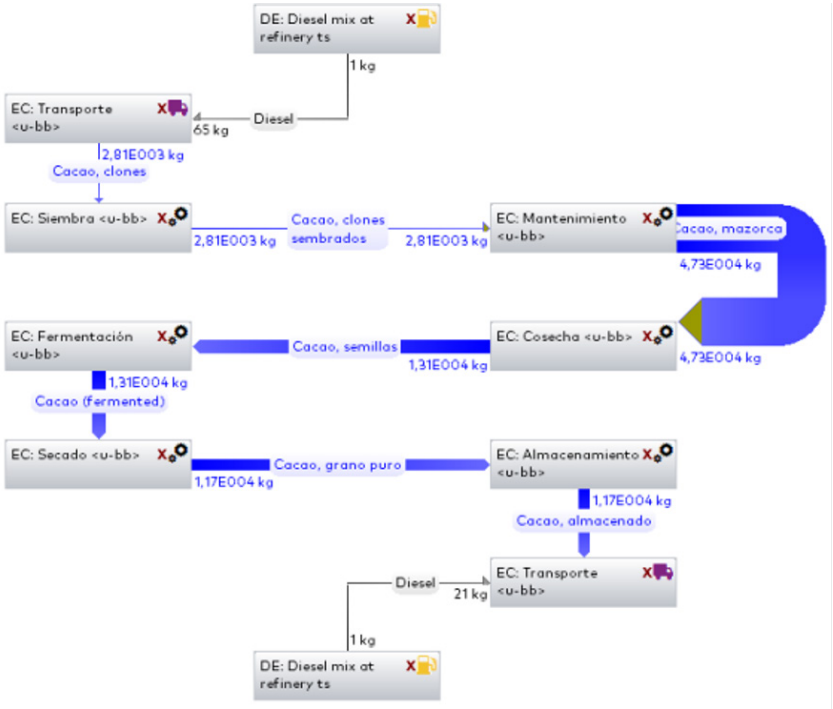

Figura 1. Flujo de procesos del ciclo de vida del cacao

El programa GaBi generó resultados que corresponden a la herramienta de evaluación de impacto ambiental TRACI 2.1 (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*), la cual brindó datos acerca de los principales impactos ambientales de los procesos. En la Fig. 2 se visualiza una generación total de 228 kg de CO_2 correspondiente al calentamiento global, incluido carbono biogénico, durante el primer ciclo de vida del cacao, según el programa GaBi, la valorización de este impacto ambiental es bueno, es decir, que el impacto no es grave para el medio ambiente. Los principales procesos que generaron mayor cantidad de CO_2 fue la introducción de Diesel para el funcionamiento de los camiones encargados del transporte.

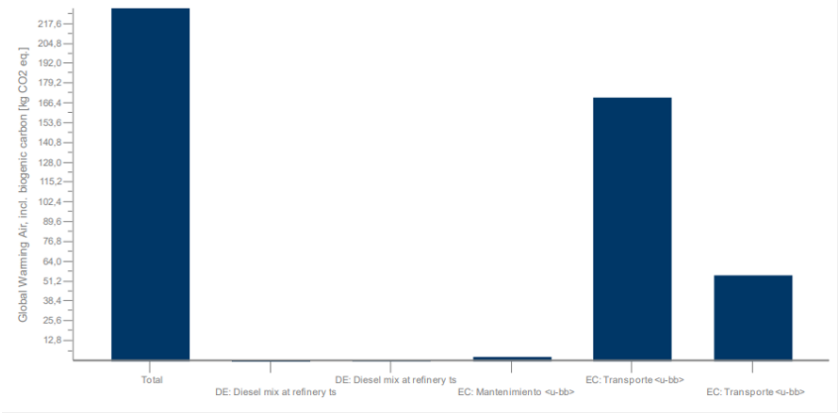

Figura 2. Calentamiento global incluido carbono biogénico

En la Fig. 3 se visualiza una generación total de 0.00462 kg de SO_2 (dióxido de azufre) correspondiente a la acidificación durante el primer ciclo de vida del cacao, según el programa GaBi, la valorización de este impacto ambiental es bueno, es decir, que el impacto no es grave para el medio ambiente. Los principales procesos que generaron mayor cantidad de SO2 fue la introducción de Diesel para el funcionamiento de los camiones encargados del transporte.

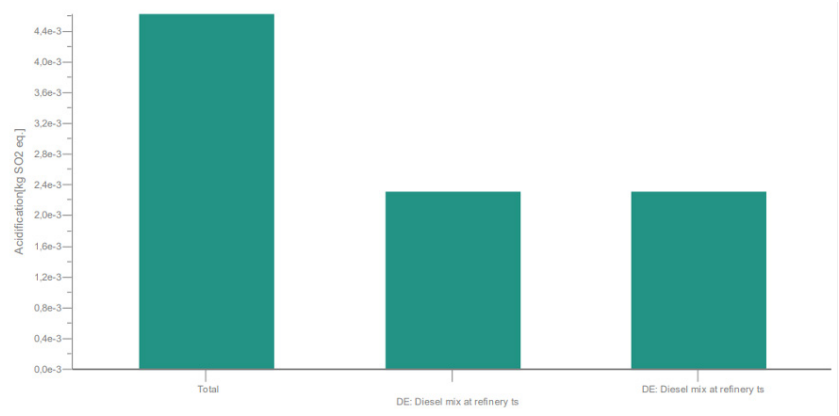

Figura 3. Acidificación en el ciclo del cacao

La Fig. 4 muestra una generación total de 0.00128 kg de N correspondiente a la eutrofización durante el primer ciclo de vida del cacao, según el programa GaBi, la valorización de este impacto ambiental es bueno, es decir, que el impacto no es grave para el medio ambiente. Los principales procesos que generaron mayor cantidad de N fue la introducción de Diesel para el funcionamiento de los camiones encargados del transporte.

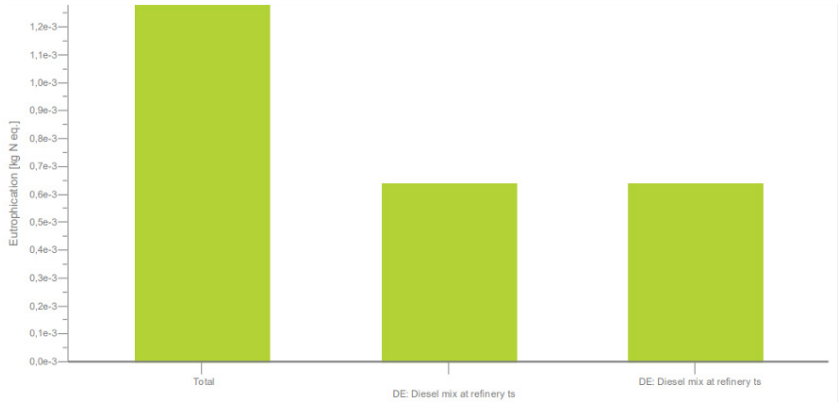

Figura 4. Eutrofización en el ciclo del cacao

La Fig. 5 presenta una generación total de 1.53E-11 kg de CFC (clorofluorocarbono) correspondiente al agotamiento del ozono durante el primer ciclo de vida del cacao, según el programa GaBi, la valorización de este impacto ambiental es bueno, es decir, que el impacto no es grave para el medio ambiente. Los principales procesos que generaron mayor cantidad de CFC fue la introducción de Diesel para el funcionamiento de los camiones encargados del transporte.

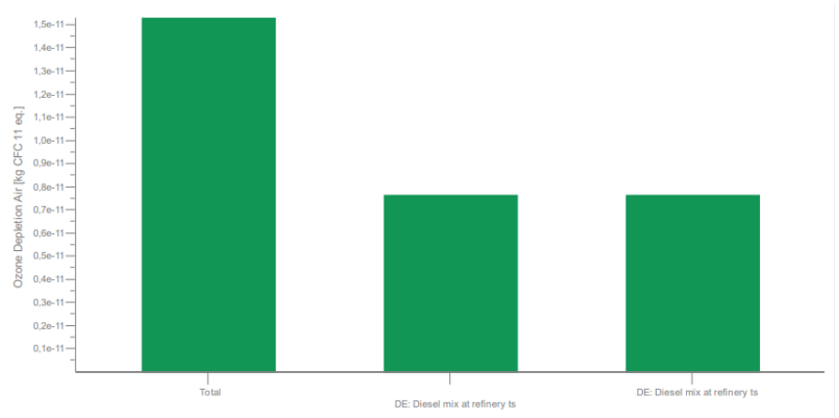

Figura 5. Agotamiento de ozono en el ciclo del cacao

La Fig. 6 presenta una generación total de 0.958 CTUe (Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas [PAF (Fracción Potencialmente Afectada de especies) m3día/kg emitido]) correspondiente a la ecotoxicidad durante el primer ciclo de vida del cacao, según el programa GaBi, la valorización de este impacto ambiental es bueno, es decir, que el impacto no es grave para el medio ambiente. Los principales procesos que generaron mayor cantidad de CTUe fue la introducción de Diesel para el funcionamiento de los camiones encargados del transporte.

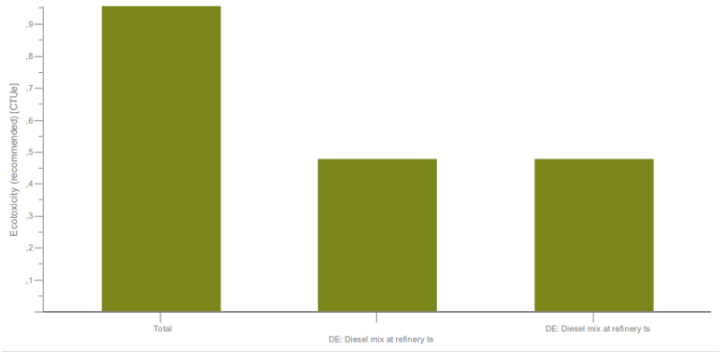

Figura 6. Ecotoxicidad en el ciclo del cacao

Según los resultados de la Tabla 1, el cultivo de cacao produce impactos de contaminación sobre el agua durante el proceso de siembra debido a actividades de riego y de abono y fertilización, también ocasiona impactos de contaminación sobre el aire durante el trasporte de semillas, el riego, el abono y la fertilización y la venta del producto final, impactos de incremento de ruido durante el transporte, la preparación de suelo y la venta del producto final, impactos de presencia de malos olores en el trasporte de semillas y venta del producto final.

Tabla 1. Impactos generados por el cultivo de cacao

Impactos generados	Etapas de la producción de cacao								
	Acopio	Siembra					Cosecha		
	Transporte de semillas	Germinar semilla	Preparación de suelo	Siembra de la planta	Riego	Abono/ fertilización	Recolección del fruto	Secado de granos	Venta del producto final
1. Sobre el agua									
Contaminación					X	X			
Disminución del caudal									
Cambio de uso									
2. Sobre el aire									
Contaminación	X				X	X			X
Incremento del ruido	X		X						X
Presencia de malos olores	X								X
3. Sobre el suelo									
Pérdida de suelos									
Acidificación						X			
Salinización					X				
Erosión			X						
Contaminación	X				X	X			X
4. Sobre vegetación y fauna									
Pérdida de biodiversidad			X			X			
Extinción de especies									
Alteración sobre especies endémicas									
5. Sobre población									
Enfermedades					X	X			

Continuando, se produce impactos sobre el suelo en cuanto a la acidificación durante el abonado y la fertilización, salinización durante el riego, erosión durante la preparación del suelo, y, contaminación durante el transporte de semillas, riego, abonado y fertilización. Adicionalmente, se produce impactos sobre la vegetación y fauna, existiendo pérdida de biodiversidad por la preparación del suelo, ocasionado por el ruido de maquinarias y actividad humana, y el abono y fertilización, que al usar productos muy fuertes destruye la biodiversidad microbiológica.

Finalmente, el cultivo de cacao puede ocasionar impactos sobre la población circundante, por las actividades de riego, al contaminar aguas de posible uso humano, y el abonado y la fertilización, donde, si no se usan adecuadamente estos tipos de productos pueden provocar reacciones contrarias en la piel y/o vías respiratorias.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados confirman que el transporte es una de las principales fuentes de emisiones en la cadena de suministro de productos agrícolas. Por ejemplo, Silva-Parra et al. (2021) identificaron que el transporte representaba hasta el 40% de las emisiones totales de GEI en la producción de café en Colombia. Asimismo, en un análisis del ciclo de vida del aceite de palma en Malasia, Hassan et al. (2011) reportaron que el uso de combustibles fósiles durante el transporte contribuye significativamente al calentamiento global, destacando la necesidad de optimizar esta etapa para reducir la huella de carbono.

En el caso del cacao, las emisiones de 228 kg de CO_2 son menores en comparación con cultivos más intensivos en insumos y transporte, como el maíz, trigo, según autores (Ortiz-Rodríguez et al., 2016). Sin embargo, esto no exime al sector cacaotero de la responsabilidad de implementar mejoras sostenibles en su cadena de valor. Por ejemplo, estudios como el de Toplicean & Datcu (2024) sugieren que la integración de prácticas de economía circular, como el uso de biocombustibles derivados de subproductos agrícolas, podría reducir significativamente las emisiones asociadas al transporte.

Estudios similares respaldan que el uso de combustibles fósiles en actividades agrícolas contribuye significativamente a la acidificación. Por ejemplo, Munasinghe et al. (2019) reportaron que en la producción de aceite de palma, el transporte y la maquinaria agrícola son responsables de una alta proporción de emisiones de SO2, afectando negativamente los ecosistemas acuáticos y terrestres. De manera similar, varios estudios han destacado en la evaluación del ciclo de vida del café en Colombia, que el dióxido de azufre emitido durante el transporte genera impactos en la calidad del aire, que a largo plazo afectan la biodiversidad y la salud humana (Coltro et al., 2024).

En el contexto del cacao, la literatura evidencia el impacto ambiental en la cadena de suministro del cacao sugiriendo que las emisiones de SO_2, aunque menores en comparación con otros contaminantes, contribuyen significativamente a la acidificación local cuando las distancias de transporte son amplias (Rahmah et al., 2024). Estos hallazgos subrayan la importancia de implementar estrategias que reduzcan las emisiones derivadas del uso de diesel en el transporte.

A pesar de los bajos niveles de SO_2 registrados en este estudio (0.00462 kg), otras investigaciones como el de Lourenço et al. (2024) sugiere que incluso emisiones moderadas de dióxido de azufre pueden generar impactos acumulativos en áreas vulnerables. En este sentido, es fundamental integrar tecnologías sostenibles, como el uso de biocombustibles o vehículos eléctricos, para reducir las emisiones de SO_2 asociadas al transporte agrícola.

Estudios previos han demostrado que el uso de combustibles fósiles, como el diesel, en la maquinaria agrícola y el transporte es una fuente significativa de emisiones relacionadas con la eutrofización. Por ejemplo, Wyer et al. (2022) destacaron que las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y amoníaco (NH3), derivados del transporte y la aplicación de insumos agrícolas, contribuyen de manera importante a la eutrofización, afectando cuerpos de agua cercanos a las áreas de producción agrícola.

Asimismo, la literatura menciona que durante el transporte y la logística tienen impactos acumulativos sobre los ecosistemas acuáticos, promoviendo el crecimiento excesivo de algas y alterando la calidad del agua (Kumar et al., 2021). Este patrón también es respaldado por Caicedo-Vargas et al. (2022), quienes analizaron el impacto económico y ambiental del cacao en la región Amazónica del Ecuador y concluyeron que las emisiones asociadas a la logística, aunque bajas, contribuyen significativamente a la eutrofización en regiones con sensibilidad ambiental.

En comparación con otros cultivos, el impacto de 0.00128 kg de N en el ciclo de vida del cacao es menor. Según autores, cultivos intensivos como el trigo o el maíz generan niveles significativamente mayores de emisiones relacionadas con la eutrofización debido al uso de fertilizantes y actividades de transporte a gran escala (Rebolledo-Leiva et al., 2022). Sin embargo, incluso valores bajos como los obtenidos en este estudio pueden tener un impacto significativo a largo plazo si no se implementan medidas de mitigación adecuadas.

Estudios similares confirman que los

combustibles fósiles, incluidos el diesel, contribuyen indirectamente al agotamiento del ozono debido a la generación de sustancias precursoras de CFC y otros gases halogenados. Por ejemplo, estudios de Pelletier et al. (2008) identificaron que las emisiones relacionadas con el transporte y el uso de maquinaria agrícola contribuyen en pequeña medida al agotamiento del ozono, pero tienen un efecto acumulativo cuando se consideran en múltiples ciclos productivos.

De manera similar, Wani y Mishra (2022) encontraron que en la producción de manzano de palma, el transporte y las actividades relacionadas con el almacenamiento son responsables de una proporción de las emisiones que afectan la capa de ozono. Esto coincide con los resultados de Pérez-Neira et al. (2020) quienes analizaron la cadena de suministro del cacao y concluyeron que, aunque el agotamiento del ozono tiene una baja contribución relativa en comparación con otros impactos ambientales, no debe ser subestimado debido a su relevancia global.

En comparación con otros cultivos, el impacto de 1.53E-11 kg de CFC durante el ciclo de vida del cacao es considerablemente bajo. Sin embargo, la literatura señala que incluso pequeñas cantidades de CFC pueden tener efectos perjudiciales en la atmósfera, especialmente cuando provienen de fuentes persistentes como los combustibles fósiles (di Filippo et al., 2022). Esto destaca la necesidad de buscar alternativas sostenibles para reducir estas emisiones, como el uso de combustibles renovables o sistemas de transporte eléctricos.

Guddaraddi et al. (2023) sugieren que una solución viable es la transición hacia una economía circular en las cadenas de suministro agrícolas. Esto incluye la reutilización de residuos agrícolas para producir biocombustibles, que pueden reducir significativamente las emisiones de gases que contribuyen al agotamiento del ozono y otros impactos ambientales. Además, las políticas públicas que incentiven la adopción de tecnologías limpias y prácticas sostenibles en la producción agrícola también pueden desempeñar un papel crucial.

Estudios previos han señalado que las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles, como el diesel, pueden liberar compuestos tóxicos al medio ambiente, afectando tanto los ecosistemas terrestres como acuáticos. Por ejemplo, Vouitsis et al. (2023) encontraron que en la producción de aceite de palma, las emisiones asociadas al transporte y al uso de maquinaria contribuyen significativamente a la ecotoxicidad debido a la liberación de metales pesados y compuestos orgánicos persistentes al ambiente. Esto coincide con lo reportado por Oginah et al. (2023) quienes en su estudio destacaron que, aunque las emisiones de ecotoxicidad son relativamente bajas, pueden causar efectos acumulativos en la biodiversidad local.

En el caso de los cultivos de cacao, Buor (2022) señalaron que las actividades logísticas, incluida la aplicación de insumos químicos y el transporte, son responsables de liberar sustancias que pueden alterar la salud de los ecosistemas acuáticos cercanos. Este impacto es particularmente relevante en regiones como Loreto, donde los ecosistemas son sensibles y ricos en biodiversidad. Estudios advierten que incluso valores bajos de ecotoxicidad pueden ser significativos cuando afectan especies clave o ecosistemas sensibles, como los presentes en áreas amazónicas (Posthuma et al., 2019).

Para mitigar este impacto, es crucial explorar alternativas sostenibles en el transporte y la gestión de insumos agrícolas. La transición hacia combustibles renovables o la electrificación del transporte agrícola podría reducir significativamente la ecotoxicidad. Además, la implementación de prácticas de economía circular, como la valorización de subproductos para la generación de energía limpia, podría disminuir la dependencia de combustibles fósiles, reduciendo el impacto sobre los ecosistemas.

La producción de cacao tiene impactos significativos, especialmente en las dimensiones ambiental y social. Las etapas más críticas en términos de impacto ambiental son el riego, el abono y fertilización, y la venta del producto final, afectando principalmente el agua, el aire y el suelo. Estas problemáticas destacan la necesidad de implementar prácticas sostenibles, como la gestión adecuada de insumos y el uso eficiente de recursos, para mitigar los impactos negativos en el entorno y en las comunidades locales.

V. CONCLUSIONES

El análisis del ciclo de vida de las plantaciones de cacao en el cantón Loreto evidenció impactos ambientales en múltiples dimensiones, siendo el uso de diesel en el transporte uno de los principales contribuyentes a la emisión de contaminantes como CO_2, SO_2 y N, con implicaciones en el calentamiento global, la acidificación y la eutrofización. A pesar de que la magnitud de estos impactos fue calificada como baja por la herramienta TRACI 2.1, su persistencia resalta la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles.

El riego, abonado y fertilización representan etapas críticas por su contribución a la contaminación del agua y del suelo, con efectos como la salinización, acidificación, y pérdida de biodiversidad microbiológica. Asimismo, la contaminación del aire y el incremento del ruido, relacionados con el transporte y la venta del producto final, afectan la calidad ambiental y la salud de las comunidades cercanas. Estas problemáticas subrayan la importancia de gestionar adecuadamente los insumos agrícolas y minimizar el uso de productos químicos.

La exposición a residuos agrícolas y químicos provenientes del riego y la fertilización no solo impacta los ecosistemas locales, sino que también representa un riesgo para la salud de las poblaciones circundantes. Las enfermedades dermatológicas y respiratorias relacionadas con la gestión inadecuada de residuos agrícolas resaltan la necesidad de fortalecer las medidas de mitigación en estas actividades.

El enfoque en la economía circular ofrece oportunidades significativas para transformar los subproductos del cultivo de cacao, como la cascarilla y otros residuos, en recursos útiles para aplicaciones industriales, agrícolas y medicinales. Esto no solo reduciría los impactos ambientales, sino que también impulsaría la sostenibilidad económica de las comunidades productoras.

Los resultados enfatizan la urgencia de implementar estrategias sostenibles en las etapas críticas del ciclo de vida del cacao, tales como promover la revalorización de subproductos agrícolas bajo principios de economía circular, reducir el uso de insumos químicos mediante alternativas biológicas y naturales, optimizar los procesos de transporte para minimizar el uso de combustibles fósiles y sus emisiones asociadas y fomentar la educación ambiental y la capacitación de los agricultores en prácticas sostenibles.

VI. REFERENCIAS

Alcívar-Córdova, K. S.; Quezada-Campoverde, J. M.; Barrezueta-Unda, S., Garzón-Montealegre, V. J.; Carvaja-Romero, H. (2021). Análisis económico de la exportación del cacao en el Ecuador durante el periodo 2014 – 2019. Polo del Conocimiento, 6 (3), 2430-2444. https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2522

Buor, J. K. (2022). Understanding the socio-economic and environmental impacts of Ghana's change in economic status on the upstream cocoa supply chain. Management of Environmental Quality, 33 (6), 1379-1403. https://doi.org/10.1108/MEQ-11-2021-0261

Caicedo-Vargas, C.; Pérez-Neira, D.; Abad-González, J.; Gallar, D. (2022). Assessment of the environmental impact and economic performance of cacao agroforestry systems in the Ecuadorian Amazon region: An LCA approach. Science of the Total Environment, 849, 157795. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157795

Coltro, L.; Tavares, M.; Sturaro, K. B. F. S. (2024). Life cycle assessment of conventional and organic Arabica coffees: From farm to pack. The International Journal of Life Cycle Assessment, 29 (9), 1672-1687. https://doi.org/10.1007/s11367-024-02317-7

di Filippo, R.; Bursi, O. S.; di Maggio, R. (2022). Global warming and ozone depletion potentials caused by emissions from HFC and CFC banks due to structural damage. Energy and Buildings, 273, 112385. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112385

Guddaraddi, A.; Singh, A.; Amrutha G.; Saikanth.; D. R. K.; Kurmi, R.; Singh, G.; Chowdhury, M.; Singh, B.V. (2023). Sustainable Biofuel Production from Agricultural Residues an Eco-Friendly Approach: A Review. International Journal of Environment and Climate Change, 13 (10), 2905-2914. https://journalijecc.com/index.php/IJECC/article/view/2956

Hassan, M. N. A.; Jaramillo, P.; Griffin, W. M. (2011). Life cycle GHG emissions from Malaysian oil palm bioenergy development: The impact on transportation sector's energy security. Energy Policy. 39 (5), 2615-2625. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.030

Kumar, R.; Verma, A.; Shome, A.; Sinha, R.; Sinha, S.; Jha, P. K.; Kumar, R.; Kumar, P.; Shubham, S.; Sharma, P.; Vara, P. V. (2021). Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions. Sustainability, 13 (17), 9963. https://doi.org/10.3390/su13179963

Lourenço, K. S.; Barthel, M.; Velthof, G.; Westerik, D.; Rahn, E.; Pulleman, M.; Six, J.; Giller, K.E. (2024). *Ground Zero? Let's get real on regeneration! Report: Assessing greenhouse gas emissions from post-harvest residue management in coffee and cocoa production systems*. 44 p. https://hdl.handle.net/10568/148913

Maney, C.; Sassen, M.; Hill, S. L. L. (2022). Modelling biodiversity responses to land use in areas of cocoa cultivation. Agricultural, Ecosystem and Environment, 324, 107712. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107712

Munasinghe, M.; Jayasinghe, P.; Deraniyagala, Y.; Matlaba, V. J.; Santos, J. F.; Maneschy, M. C.; Mota, J. A. (2019). Value–Supply Chain Analysis (VSCA) of crude palm oil production in Brazil, focusing on economic, environmental and social sustainability. Sustainable Production and Consumption, 17, 161-175. https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.10.001

Oginah, S. A.; Posthuma, L.; Maltby, L.; Hauschild, M.; Fantke, P. (2023). Linking freshwater ecotoxicity to damage on ecosystem services in life cycle assessment. Environment International, 171, 107705. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107705

Ortiz-Rodríguez, O. O.; Villamizar-Gallardo, R.A.; Naranjo-Merino, C.A.; García-Caceres, R.G.; Castañeda-galvís, M. T. (2016). Carbon footprint of the colombian cocoa production. Engenharia Agrícola, 36, 260-270. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p260-270/2016

Pelletier, N.; Arsenault, N.; Tyedmers, P. (2008). Scenario Modeling Potential Eco-Efficiency Gains from a Transition to Organic Agriculture: Life Cycle Perspectives on Canadian Canola, Corn, Soy, and Wheat Production. Environmental Management, 42 (6), 989-1001. https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-008-9155-x

Pérez-Neira, D.; Copena, D.; Armengot, L.; Simón, X. (2020). Transportation can cancel out the ecological advantages of producing organic cacao: The carbon footprint of the globalized agrifood system of ecuadorian chocolate. Journal of Environmental Management, 276, 111306. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111306

Posthuma, L.; van Gils, J.; Zijp, M. C.; van de Meent, D.; de Zwart, D. (2019). Species sensitivity distributions for use in environmental protection, assessment, and management of aquatic ecosystems for 12 386 chemicals. Environmental Toxicology & Chemistry, *38* (4), 905-917. https://doi.org/10.1002/etc.4373

Rahmah, D. M.; Januardi, P.; Mardawati, E.; Kastaman, R.; Kurniawan, K. I. A.; Sofyana, N. T.; Noguchi, R. (2024). Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making analysis towards sustainable cocoa production system in Indonesia: An environmental, economic, and social impact perspective. Heliyon, 10 (19). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38630

Rebolledo-Leiva, R.; Almeida-García, F.; Pereira-Lorenzo, S.; Ruíz-Nogueira, B.; Moreira, M. T.; González-García, S. (2022). Introducing lupin in autochthonous wheat rotation systems in Galicia (NW Spain): An environmental and economic assessment. Science of Total Environment, 838, 156016. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156016

Ronie, M. E.; Abdul Aziz, A. H.; Kobun, R.; Pindi, W.; Roslan, J.; Putra, N. R.; Mamat, H. (2024). Unveiling the potential applications of plant by-products in food – A review. Waste Management Bulletin, 2 (3), 183-203. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.008

Saavedra, J. F.; Vargas, O.R. (2000). Estimación del impacto ambiental del cultivo de caña de azúcar uti-

lizando la metodología del análisis del ciclo de vida (acv). Revista de Ingeniería, 12, 61-67. https://doi.org/10.16924/revinge.12.11

Salazar-Camacho, N. A.; Delgadillo-Mirquez, L.; Sanchez-Echeverri, L. A.; Tovar-Perilla, N. J. (2024). Evaluating Sustainable Alternatives for Cocoa Waste Utilization Using the Analytic Hierarchy Process. Sustainability, 16 (17), 7817. https://doi.org/10.3390/su16177817

Silva-Parra, A.; Trujillo-González, J. M.; Brevik, E. C. (2021). Greenhouse gas balance and mitigation potential of agricultural systems in Colombia: A systematic analysis. Green House Gases Science & Technology, 11 (3), 554-572. https://doi.org/10.1002/ghg.2066

Toplicean, I.-M.; Datcu, A.-D. (2024). An Overview on Bioeconomy in Agricultural Sector, Biomass Production, Recycling Methods, and Circular Economy Considerations. Agriculture, 14 (7), 1143. https://doi.org/10.3390/agriculture14071143

Viteri, O.; Ramos-Martín, J.; Lomas, P. L. (2018). Livelihood sustainability assessment of coffee and cocoa producers in the Amazon region of Ecuador using household types. Journal of Rural Studies, 62 1-9. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.06.004

Vouitsis, I.; Portugal, J.; Kontses, A.; Karlsson, H. L.; Faria, M.; Elihn, K.; Juárez-Facio, A.T.; Amato, F.; Piña, B.; Samaras, Z. (2023). Transport-related airborne nanoparticles: Sources, different aerosol modes, and their toxicity. Atmospheric Environment, 301, 119698. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119698

Wani, N. A.; Mishra, U. (2022). An integrated circular economic model with controllable carbon emission and deterioration from an apple orchard. Journal of Cleaner Production, 374, 133962. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133962

Wyer, K. E.; Kelleghan, D. B.; Blanes-Vidal, V.; Schauberger, G.; Curran, T. P. (2022). Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health. Journal of Environmental Management, 323,116285. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116285