



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Cuantificación del impacto ambiental de los pavimentos urbanos mediante el Método Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en la Región de Piura - Piura - Perú

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Civil

AUTORES:

Chau Chavez, Flavio Alexander (orcid.org/0000-0002-3820-0898)

Navarro Mendoza, Angel Jair (orcid.org/0000-0002-2120-0912)

ASESOR:

Dr. Sagastegui Plasencia, Fidel German (orcid.org/0000-0003-0836-0062)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño de Infraestructura Vial

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo económico, empleo y emprendimiento

PIURA – PERÚ

2023

DEDICATORIA

Queremos dedicar nuestro proyecto en primer lugar a Dios, por cuidarnos y brindarnos la fuerza para alcanzar nuestros objetivos.

También a nuestra familia en especial nuestros padres, por brindarnos ese apoyo y ser la motivación para superarnos

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestra alma mater La Universidad César Vallejo, que nos acogió y permitió lograr nuestras aspiraciones.

Agradecemos a nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Civil y a sus ingenieros que nos brindó todo el apoyo y conocimiento a lo largo de nuestras carreras. Por último, agradecer a nuestro Asesor Fidel German Sagastegui Plasencia por su paciencia y su dedicación a guiarnos con sus conocimientos que permitieron la realización de nuestra Tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA.....	11
III.1. Tipo y diseño de investigación.....	11
III.2. Variables y operacionalización	11
III.3. Población muestra y muestreo	12
III.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	12
III.5. Procedimiento	20
III.6. MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS.....	21
III.7. ASPECTOS ÉTICOS	21
IV. RESULTADOS	22
V. DISCUSIÓN.....	57
VI. CONCLUSIONES.....	61
VII. RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS.....	65
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°01 Factores eq. De dióxido de carbono. Elaboración Propia.	15
Tabla N°02 Valores eq. Del aledo en pavimentos.....	23
Tabla N°03 Índice de Rugosidad Admisible (Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos)	24
Tabla N°04 Cálculo del consumo de combustible. Elaboración propia.....	25
Tabla N°05 Gasto de combustible por IRI.	26
.....	30
Tabla N°06 Creación de etapas para cada proceso unitario. Pavimento Articulado. Elaboración propia	33
Tabla N°07 Impacto ambiental en la etapa de construcción para pavimento flexible. Elaboración propia	41
Tabla N°08 Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento flexible. Elaboración Propia	43
Tabla N°09 Impacto ambiental en la etapa de construcción para pavimento adoquinado. Elaboración propia.	45
Tabla N°10 Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento adoquinado. Elaboración Propia	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de combustible respecto al Índice de rugosidad. (ZAABAR 2010).....	25
Figura 2. Creación de flujos y etapas en el software Open LCA 2.0.....	28
Figura 3. Creación de un nuevo flujo. Demolición, para ambos pavimentos.	29
Figura 4. Creación de un nuevo flujo. Base Granular, para ambos pavimentos.	29
Figura 5. Creación de un nuevo flujo Carpeta Asfáltica.	30
Figura 6. Creación de un nuevo flujo Carpeta Articulado de Concreto	30
Figura 7. Creación de un nuevo proceso. Pavimento Asfáltico.....	31
Figura 8. Creación de un nuevo proceso. Pavimento Articulado	32
Figura 9. Entradas y salidas para pavimento Articulado. Software Open LCA.	34
Figura 10. Flujos de proceso para pavimento flexible. Elaboración propia	35
Figura 11. Flujos de proceso para pavimento articulado. Elaboración propia.	35
Figura 12. Creación de un nuevo producto de sistema para pavimento flexible.....	36
Figura 13. Creación de un nuevo producto de sistema para pavimento articulado.	37
Figura 14. Aplicación de la metodología de impacto TRACI 2.1.....	38
Figura 15. Resultados del Software Open LCA	39
Figura 16. Índice de impacto ambiental en la etapa de construcción de un pavimento flexible.	42
Figura 17. Índice de Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento flexible.....	44
Figura 18. Índice de impacto ambiental en la etapa de construcción de un pavimento adoquinado. Elaboración propia.....	46
Figura 19. Índice de Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento adoquinado.	47
Figura 20. Formación de smog en ambos pavimentos. (Elaboración propia.	49
Figura 21. Calentamiento global para ambos pavimentos. Elaboración propia.	50
Figura 22. Agotamiento de ozono para ambos pavimentos. Elaboración propia.	51
Figura 23. Acidificación para ambos pavimentos. Elaboración Propia.	51
Figura 24. Ecotoxicidad para ambos pavimentos. Elaboración Propia.	52
Figura 25. Eutrofización para ambos pavimentos. Elaboración Propia.....	53
Figura 26. Indicadores del bienestar humano. Elaboración Propia.....	54
Figura 27. Comparación global para las categorías TRACI 2.1 entre los Pavimentos 1 y 2....	56

RESUMEN

La presente investigación busca determinar el impacto ambiental generado por los pavimentos urbanos de Piura, aplicando el método ACV. En donde se analiza dos procesos de pavimentación en Piura, enfocándose en el pavimento asfáltico y el adoquinado. Se emplea la metodología internacional de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar los impactos ambientales, considerando ingresos (energía y recursos) y egresos (desechos y emisiones) en diversas etapas, como extracción, elaboración, traslado, construcción, operación y fin de vida. El análisis utiliza el software OpenLCA 2.0 y las bases de datos EcoInventV3, ELDC, y la metodología TRACI 2.1.

Los resultados indicaron que la fase de construcción representó entre el 78% y 86% de las emisiones totales para ambos pavimentos, destacando el pavimento adoquinado con 1.4 veces más emisiones de CO₂ que el asfáltico. Aunque este último superó al primero en siete de las nueve categorías, se concluyó que el pavimento articulado es más adecuado para vías con baja densidad vehicular. Sin embargo, en vías con tránsito medio/alto, los pavimentos flexibles son preferibles debido a las emisiones significativamente mayores generadas por las vías adoquinadas en condiciones de tráfico intenso.

Palabras clave: Impacto ambiental, pavimentos urbanos, análisis de ciclo de vida.

ABSTRACT

The present research aims to determine the environmental impact generated by urban pavements in Piura, applying the LCA method. It analyzes two paving processes in Piura, focusing on asphalt pavement and cobblestone pavement. The international Life Cycle Assessment (LCA) methodology is employed to assess environmental impacts, considering inputs (energy and resources) and outputs (waste and emissions) in various stages such as extraction, processing, transport, construction, operation, and end of life.

The analysis utilizes OpenLCA 2.0 software and databases EcolInventV3, ELDC, and TRACI 2.1 methodology. Results indicated that construction accounted for 75% to 85% of total emissions for both pavements. Cobblestone pavement showed 1.4 times more CO₂ emissions than asphalt pavement. Although the latter outperformed the former in seven of nine categories, it was concluded that concrete articulated pavement is more suitable for low-traffic-density roads. However, in roads with medium/high traffic, flexible pavements are preferable due to significantly higher emissions generated by cobblestone roads under intense traffic conditions.

Keywords: Environmental Impact, Urban Pavements, Life Cycle Assess.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el aumento de la crítica internacional acerca de la opinión pública a los procesos constructivos industriales, con alto índice de contaminación, incentiva a investigar, de alguna forma, los costos ambientales producidos por esos procesos. Debido a esto se comenzó a implementar el análisis de ciclo de vida (ACV), para darle más importancia en el mundo a cada uno de los procesos y etapas que se desarrollan en un proceso industrial. De esta manera se hizo un análisis de la energía consumida, las emisiones generadas y de los recursos naturales utilizados en estos mismos.

Actualmente, es muy importante contemplar la aplicación del ACV en los agregados y recursos, al momento de planificar un proyecto para la ejecución de una carretera. Iniciando desde la primera extracción de recursos, el proceso constructivo, el mantenimiento rutinario y hasta el final de la vida útil del pavimento. El aumento del 11 % al 15 % en las emanaciones en la industria del transporte en los años 2000 - 2010, en el cual el 70 % de estas emisiones se atribuyeron al mantenimiento de pavimentos específicamente al sector de construcción, esto demandó una investigación sobre este tema (Lu et al., 2019)

No ajeno a esto el gran crecimiento de la población en Piura generó un incremento numeroso del flujo vehicular total según unidades de peaje - Piura, de 90 mil vehículos en el año 2013 a 271 mil en el año 2023 (INEI, 2023), aumentando la necesidad de obtener mayor eficiencia seguridad y comodidad a las personas que transitan por las vías urbanas. Este logro conllevó el empleo de métodos y estudios que faciliten la toma de decisiones frente a la mejora de los pavimentos, con efecto positivo en el ámbito ambiental. No obstante, no se ha investigado ni cuantificado la consecuencia ambiental de ambos Pavimentos para poder concluir si alguno tiene mayores beneficios que el otro.

La metodología del ACV en las vías urbanas es un método que dio la facilidad de seleccionar la opción técnica económica que ayudó a que el estudio del impacto ambiental de las mismas sea más eficiente, por medio de la cuantificación del uso de materiales, agregados y emanaciones del ambiente, apartados de las infraestructuras viales analizadas. A través del flujo de entradas y salidas de la

metodología de análisis del ciclo de vida, abarcando desde, agregados, fabricación y acarreo hacia la zona de depósito, el desarrollo de su tiempo de función hasta cumplir su vida útil.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una técnica que cuantifica de manera sistemática el impacto ambiental de un producto o servicio (ISO, 2006). Estas directrices son definidas por las normas globales ISO 14040 y ISO 14044, las cuales son elaboradas por la Organización Internacional de Normalización (ISO). El ACV se caracteriza por ser una herramienta de análisis integral que evalúa todas las fases de un producto, desde la adquisición de materias primas hasta la gestión de los desechos generados durante su uso. Asimismo, proporciona múltiples ventajas significativas.

De tal manera que en la investigación presente se realizó la formulación del problema general: ¿Por qué se debe aplicar la metodología de Análisis del ciclo de vida (ACV) en los Pavimentos Urbanos en la región de Piura? y como preguntas específicas: ¿Por qué se debe determinar qué etapas del ciclo de vida de cada pavimento presentan mayor impacto ambiental?, ¿Qué beneficios tiene aplicar el método ACV en los Pavimentos Urbanos de Piura?, y ¿Por qué se debe comparar los impactos obtenidos de ambos pavimentos de la región Piura.?

Así mismo, el desarrollo del siguiente trabajo de investigación tiene justificación ya que, siendo estas vías de comunicación muy importantes para el desarrollo y crecimiento de un país en el aspecto económico, social, cultural y político, no tienen las características adecuadas.

Para poder cumplir con la meta propuesta de revisar la aplicabilidad de una nueva metodología que aumente la garantía de mantener los pavimentos en un buen estado, es necesario el planteamiento de objetivos que respondan a la solución de los problemas de la presente investigación, es así como el objetivo general se plantee: Determinar el impacto ambiental generado por los pavimentos urbanos de Piura, aplicando el método ACV.

Para ello se abordará los siguientes objetivos específicos: 1. Determinar cuáles fases del del ciclo de vida de cada pavimento generan un impacto ambiental más significativo. 2. Identificar los beneficios que tiene la aplicación del método ACV en los Pavimentos

Urbanos en la región de Piura. 3. Comparar el impacto generado por ambos pavimentos para elegir opción adecuada desde una perspectiva ambiental.

Como hipótesis se tiene que luego de aplicar el método de Análisis del ciclo de vida, el pavimento cuya capa de rodadura está constituida por adoquín (Pavimento articulado de concreto), bajo las mismas condiciones de suelo, características de uso y temperatura, conlleva una menor carga ambiental que la generada por un pavimento de carpeta asfáltica mayormente utilizados en las vías de locales de la región de Piura. Con este pensamiento del ciclo de vida de los recursos; se busca inspirar, nuevos estudios acerca de pavimentos urbanos eco ambientales que sean más sostenibles con el medio ambiente y a su vez que disminuyan el impacto negativo en él. Por lo que, si es verdad, que las construcciones de carreteras prueben económicamente un impacto positivo para el Perú; no se tiene que descuidar las investigaciones acerca del impacto ambiental, que ocasiona el rubro de la construcción.

II. MARCO TEÓRICO

Yuan et al. (2023), En su artículo titulado “Análisis Integrado del Ciclo de Vida del Costo Emisiones de CO₂ de los Vehículos y Actividades de Obras de Construcción en la Vida Útil del Pavimento de Carreteras” proporcionaron, mediante su objetivo, un método aplicable, estimando el índice del impacto ambiental y económico causado por la actividad vehicular influyente en la vida útil de un determinado tramo de pavimento de carretera, dando origen a decisiones y estrategias para su gestión.

Los autores, utilizaron como métodos de análisis, (LCA) evaluación del ciclo de vida y (LCCA) análisis del costo del ciclo de vida, reconsideran emisiones de CO₂, con los principales módulos de análisis (módulo de materiales, zona de trabajo, de uso y actividades laborales) presentes en el LCA. Junto con los costos de usuario y los costos de agencia en relación al uso del pavimento, demora en la circulación del lugar de trabajo, actividades de trabajo y variantes en el proceso LCCA. Como ayuda de estudio, emplearon un proyecto en una autopista en China, con el fin de comprobar la aplicación del modelo integrado.

En su investigación los resultados arrojaron el beneficio tanto para emisiones de CO₂ y costo, dando un ahorro de 36.8 ton/carril/km de emisiones CO₂ y 10.530 USD/carril /km (en dólares de 2007), siendo prueba de las ventajas de un mantenimiento óptimo, ahorro de acuerdo a emisiones de CO₂ y costos financieros.

Liu et al. (2023), En su investigación “Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero con análisis de incertidumbre: un estudio de caso de pavimento asfáltico en China”. Dio a conocer el grado de incertidumbre respecto al proceso de (LCA). En su investigación se plantea como objetivos una cuantificación precisa de emisiones de carbono (CE) en el transcurso de la vida útil de los pavimentos.

En su estudio implementó un sistema un análisis de sensibilidad, también usa un sistema adecuado para la cuantificación de incertidumbre, como incertidumbre utilizó el índice de calidad de datos (DQI) junto con el método de distribución beta, desarrolló un sistema para cuantificar la incertidumbre y se realizó un estudio de caso junto con un análisis de sensibilidad, donde usó el resultado de muestreo por sectores, a través del método de Hermite que describe el antes y después de los parámetros de

incertidumbre, la confiabilidad de los datos de emisiones (CE) y complementos de congestión. En esta investigación se evaluó específicamente la incertidumbre de un tramo de LCA de pavimento de carretera. La incertidumbre en forma de modelo tiene más influencia sobre los resultados de emisiones de carbono de un pavimento, con un aporte de (CE) entre 90% y 94%. En su investigación concluyó implementar una base integral, para la mejora de un Análisis de ciclo de vida de los pavimentos

Picardo et al. 2023, en su estudio “Evaluación comparativa del ciclo de vida y costeo de los sistemas de iluminación para el diseño ambiental y la construcción de carreteras sostenibles”. Afirma la complejidad del mantenimiento eficaz sostenible de una red vial, evitando el riesgo de afectación al ecosistema. Como punto principal de su estudio, tomó los sistemas de iluminación influyente principalmente en el consumo de energía, efectos sobre la salud y al cambio climático.

En su análisis y evaluación ecoeficiente del ciclo de vida de un pavimento y el aporte relativo del sistema de iluminación, dichos autores propusieron la combinación de los estudios de coste del ciclo de vida (LCC) y (ACV). Trabajaron con 4 variables: Lámparas de sodio de alta presión con balasto (S1); lámparas halógenas(S2); (S3) lámparas de diodos emisores de luz alimentados desde la red (S3); y lámparas de diodos emisores de luz alimentadas desde un sistema fotovoltaico independiente (S4). Obtuvieron como resultados las variables más eficientes y económicamente viables, (S3) y (S1) a diferencia de la variable (S2).

Zhao y Yang. 2023, en su artículo titulado “Evaluación del ciclo de vida y evaluación del rendimiento de múltiples índices del pavimento semiflexible después de la modificación compuesta mediante el uso de cenizas volantes, partículas de caucho, asfalto de mezcla tibio y pavimento de asfalto reciclado”. Determinó la calidad y capacidad de durabilidad de una estructura de pavimento semiflexible.

Los autores en su investigación, buscaron alcanzar la reducción de las emisiones y consumo de energía durante la vida útil de SFP asegurando su funcionalidad a través de la aplicación de partículas de caucho, RAP en SFP, tecnología de mezcla en caliente, cenizas volantes. Describieron el procedimiento empleado y como respuesta una reducción significativa de la emisión SFP y el consumo de energía. A diferencia de

la reducción de emisiones SFP y el efecto de ganancia de la reducción de energía, empleando cemento como alternativa. Por otro lado, indicaron que el efecto de ganancia de la modificación respetuosa con el medio ambiente del esqueleto de la matriz de hormigón asfáltico es general en ambos casos. Determinaron distintas metodologías como (RAP) Pavimento Asfáltico Reciclado, con un alto contenido, incrementará el consumo de las emisiones SFP y el consumo de energía. Como resultados obtuvieron, la utilización de metodologías eco ambientales descritas mejora e incrementan el ciclo de vida útil de un Pavimento Semiflexible (SFP).

Martínez et al. 2023, en su artículo titulado “Evaluación del ciclo de vida del asfalto de mezcla tibia natural a base de zeolita y el pavimento de asfalto recuperado”. Describieron la importancia social, económica y política de los pavimentos y la gran cantidad que están conformados por mezcla asfáltica, compuesta por combustibles fósiles y elementos áridos, de los cuales su disponibilidad es limitada. Evaluó y comparó el manejo y comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, sin dar a conocer los impactos generados al medio ambiente.

En su investigación plantearon presentar y contrastar mediante la evaluación del ciclo de vida útil, empleando el enfoque denominado “de la cuna a la puerta”, teniendo como muestra distintas mezclas de asfalto cuyos componentes desempeñan el mismo rendimiento, mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica en caliente (HMA) como muestra de control, mezcla asfáltica (WMA) utilizando zeolita natural, Evotherm ®y (RAP) pavimento asfáltico recuperado en diferentes proporciones. Para el análisis desarrollado utilizaron metodologías, con antecedentes de datos confiables como lo es el software SimaPro 9, empleando el método ReCiPe versión 1.11, siendo este el más adecuado.

Como muestra utilizaron 1000 kg de asfalto para su comparación de los impactos ambientales. Con el uso de esta metodología sustentaron la eficacia de emplear zeolita natural o Evotherm® como alternativa de manteniendo de pavimentos. la condición de influencia del calentamiento global, la reducción entre una mezcla con RAP, HMA estándar y zeolita dan un aproximado de 8%, respecto al consumo de combustibles fósiles, lograron una reducción del 13% del uso de estos materiales para la elaboración de mezclas asfálticas.

Gruber et al. 2022, en su artículo titulado “Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de pavimento de asfalto reciclado” Describieron la necesidad y obligación de mitigar el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) dados en la construcción de pavimentos, relacionado al impacto en el cambio climático. La metodología empleada está basada en la evaluación de del ciclo de vida (LCA), según describen los autores de esta investigación, existen datos de estudios sobre el proceso de producción de mezcla asfáltica, dichos datos provienen de bases de datos únicas y fuentes que no garantizan la fiabilidad de sus resultados.

Es por ello que los autores, en su investigación recopilaron datos de revistas de literatura, garantizando así la validación de sus resultados, a comparación de solo enfocar la recopilación de datos en sitios informativos de construcción, ahorro de energía y la evaluación de canteras y plantas procesadoras de asfalto. Mediante su investigación sustentaron como resultados de su investigación la influencia del ligante asfáltico en la huella del material, el beneficio del uso de material nuevo en un pavimento a diferencia de un material reciclado, y el índice de participación del material húmedo, en relación a los GEI en el proceso de producción.

Examinaron y compararon dos tramos de carretera con un volumen de tráfico creciente (y una proporción cada vez mayor de movilidad eléctrica) con las emisiones de (GEI) relacionadas con el tráfico durante una vida útil de 30 años. Mediante este análisis afirmaron que el tráfico tiene un alto nivel de afectación en las emisiones de GEI, cuyo porcentaje es (95%).

Grace et al. (2023), en su artículo titulado “Evaluación del ciclo de vida de pavimentos de subbase de concreto celular liviano en Canadá”. Evidenciaron su propuesta del uso de (LCC) hormigón ligero celular, como material a emplear en la subbase de pavimento asfáltico típico en regiones de temperatura elevada. sin embargo el alto contenido de cemento genera una incertidumbre en su utilización siendo un componente que en su gran parte está conformado por (CO₂).

Dichos autores tomaron tres índices de densidad (600,475,400 Kg/m³) de hormigón ligero celular, empleándolas en las metodologías de mezcla seca y húmeda, comparando sus resultados con material granular no ligado (granular A y B) como

pavimento de mezcla asfáltica. Para evaluar el rendimiento del pavimento utilizaron datos obtenidos de los programas WESLEA y MEPDG, asemejando sus resultados con los datos obtenidos en campo como base para el mantenimiento de la carretera.

Como resultados de su evaluación del ciclo de vida (LCA), dedujeron lo siguiente: con una menor densidad disminuyeron los costos ambientales, debido a la reducción de las emisiones de CO₂ alcanzado un 16 %, sin embargo con la mitigación del impacto ambiental de SO₂ (dióxido de azufre), NO (óxido de nitrógeno), CO (monóxido de carbono) y material articulado (PM) 2,5 , PM 10y PM total a diferencia de las carreteras granulares A y B. por otro lado determinaron que el aumento de la densidad de LCC, produce un aumento en las GEI, demostrando el beneficio de emplear la densidad para la producción de emisiones. Con su investigación demostraron los aportes potenciales del uso de LCC como un material de pavimento de subbase alternativo.

Plescan et al, 2022. En su artículo de investigación titulado “Evaluación del ciclo de vida de la rehabilitación de pavimentos de hormigón: un estudio de caso rumano”. Dieron a conocer el sistema de evaluación eco ambiental más utilizado en Europa, con el fin de determinar el ciclo de calidad y durabilidad de un producto es el análisis del ciclo de vida (ACV), por tal motivo dichos autores, empleando los recursos necesarios para esta investigación, emprendieron la búsqueda de nuevas metodologías y programas aplicables a la evaluación del ciclo de vida de los pavimentos, razón por la cual se realizaron esfuerzos sustanciales en las últimas dos décadas para desarrollar nuevas metodologías y software de evaluación del ciclo de vida (LCA) en Rumania.

Los autores describieron al calentamiento global y cambio climático como el mayor problema ecológico que afecta directamente a la humanidad. En dicho estudio el enfoque empleado se basó en un análisis del ciclo de vida (ACV) de la cuna a la puerta. Utilizaron tres alternativas de restauración de pavimentos, empleadas en el programa (GaBi), Ganzheitlichen Bilanzierung (equilibrio holístico en alemán), evaluando distintos impactos según el objeto de estudio, impacto a la salud humana, el impacto estratosférico del ozono e impacto ambiental del calentamiento global.

Los resultados obtenidos en su evaluación del ciclo de vida de un pavimento muestran diseños sostenibles para la construcción y restauración de pavimentos de carreteras.

Calle, 2019. En su investigación titulada “ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS EN LIMA (PERÚ)”. Describió el alto índice de demanda en la construcción de edificios ocasionado por el aumento de la inversión privada en el país. sin embargo, la falta de importancia a los estudios que se deben realizar limita su presencia, surgiendo como alternativa de solución el estudio de análisis del ciclo de vida de un producto (ACV), que se rige a la norma ISO 14040 e ISO 1044. En su investigación se planteó como objetivo identificar cual es la fase más determinante en el ciclo de vida de un edificio de oficinas en la ciudad de lima, Perú

Calle, en su investigación mostró como resultados que la etapa de uso tiene un alto impacto respecto a energía primaria, ya que abarcó más del 80% del total, a causa del uso de electricidad durante la vida útil de la estructura. Aparte, la fase que precede al uso influyó en mas del 50% de las categorías de impacto consideradas y demandó el 15% de la energía primaria en consecuencia de como consecuencia de la fabricación de recursos como, el concreto premezclado, el vidrio y acero de refuerzo. Finalmente, dedujo que las fases de construcción, operación y fin de vida no resultaron impactantes a diferencia de las analizadas anteriormente.

La metodología Análisis del Ciclo de Vida, es un proceso de evaluación ambiental que se rige por las normas ISO, (ISO 14040 y 14040, 2006).

La idea de ACV se inició en la década de 1960 cuando la degradación ambiental y, en particular, el acceso limitado a los recursos empezó a convertirse en una inquietud. En esta parte se brindó un resumen del surgimiento de ACV, centrándose en los campos de desarrollo metodológico, aplicación, armonización y estandarización internacional y difusión. ACV tuvo sus raíces tempranas en los estudios de empaque y se centró principalmente en el uso de energía y algunas emisiones, lo que estimuló un desarrollo de métodos en gran parte descoordinado en los EE. UU. y el norte de Europa.

Los estudios se realizaron principalmente para las empresas, que los utilizaron internamente y realizaron poca comunicación con las partes interesadas.

En la década de 1970, entre los años de 1980 y 1990 se dió un aumento en el desarrollo metodológico y la colaboración y coordinación internacional entre la comunidad

científica y el desarrollo de métodos tuvo lugar cada vez más en las universidades. (Bjorn et al, 2018).

Se realizaron numerosos esfuerzos para establecer una metodología estandarizada para el Análisis del Ciclo de Vida. En 1994, se publicó la guía nacional del método ACV Z-760, brindando información detallada sobre la metodología, posteriormente en la década de 1990 la Organización Internacional de Normalización (ISO) brindó los estándares más conocidos y utilizados. (Khasreen et al., 2009).

Para el año 2002, se inició la "Iniciativa Global de Ciclo de Vida" mediante la colaboración de la UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y la SETAC (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental). En la tercera fase esta iniciativa tiene como objetivo fomentar la consideración del ciclo de vida y la aplicación efectiva de este. Además, está alineada con el plan de desarrollo sostenible a diez años, establecido por la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible (WSSD), y el plan de Johannesburgo 2002 (Cáceres, 2016).

III. METODOLOGÍA

III.1. Tipo y diseño de investigación

III.1.1. Tipo de Investigación:

- La tesis presentada es de tipo Aplicada porque se basará en la utilización de métodos y técnicas científicas para abordar desafíos específicos en diversos campos. Se orientará a encontrar soluciones prácticas y efectivas a problemas reales, ya sea en el ámbito del bienestar humano, la tecnología, la ingeniería, entre otros.

III.1.2. Diseño de Investigación:

- La presente investigación se realizó utilizando un enfoque cuantitativo, en la cual se obtuvo el impacto ambiental de las estructuras analizadas, mediante el uso de medidas numéricas, empleando los indicadores propuestos.

III.2. Variables y operacionalización

- **Variable independiente:** Análisis del Ciclo de Vida.

Definición conceptual: Es un método para determinar la calidad y sostenibilidad de un pavimento, esta evaluación va desde la extracción de los materiales a emplear en el pavimento hasta el fin de la vida útil del mismo.

Definición operacional: Se usará el software OpenLCA, que medirá la cantidad de emisiones generadas en el proceso constructivo de un pavimento.

Indicadores: Aplicabilidad, calidad, sostenibilidad.

- **Variable dependiente:** Pavimento Urbano

Definición conceptual: Según el (MTC, 2018). Forma parte de la infraestructura vial, está constituido por capas de materiales (subbase, base y capa de rodadura), con el fin de resistir y distribuir las cargas generadas por el tránsito vehicular, facilitando el libre tránsito vehicular.

Definición operacional: Se evaluará el pavimento en cada etapa de su proceso constructivo, desde la primera actividad como lo es la extracción de los recursos naturales, hasta el cumplimiento de su vida estructural útil.

III.3. Población muestra y muestreo

III.3.1. Población:

En la presente tesis se tomó como población dos pavimentos urbanos de la región de Piura – provincia de Piura - Distritos de Castilla y 26 de octubre.

- **Criterios de inclusión.** Se incluyeron los pavimentos más utilizados en la región de Piura
- **Criterios de exclusión.** Se excluyeron los pavimentos menos utilizados en la región de Piura

III.3.2. Muestra:

Hace referencia a una sección de la población, la cual sirvió como parte de estudio para los resultados. En esta investigación se tomó una sección de 01 pavimento flexible y 01 pavimento articulado o adoquín de concreto, los cuales fueron analizados mediante el software OpenLCA junto al soporte de datos de Ecoinvent V3.

III.3.3. Muestreo:

Es una técnica de elección de la muestra, en esta investigación se tomó la muestra mediante una selección aleatoria ejecutados en los últimos 2 años, ya que un pavimento está constituido por materiales similares antes de ser definido flexible o articulado.

III.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la selección de información en la presente tesis se hizo uso de la observación, en la toma de la muestra se utilizará una selección aleatoria y en el proceso de Análisis del Ciclo de Vida, se empleó el software OpenLCA 1.7.0, la base de datos Ecoinvent V3 y el Método de impacto TRACI 2.1.

III.4.1. OpenLCA 2.0.0

Es una herramienta de programación de código abierto que posibilita a los usuarios llevar a cabo análisis del ciclo de vida en productos, servicios y sistemas. Este tipo de análisis implica identificar, medir y valorar los efectos ambientales causados por los mismos durante su tiempo de vida, desde la obtención de recursos naturales hasta su fase de desuso.

III.4.2. Ecoinvent V3

Ecoinvent v3 se destaca por su extensa cobertura, su enfoque centrado en procesos, la alta calidad de sus datos y su transparencia. La base de datos abarca una amplia variedad de sectores industriales y agrícolas, así como información sobre transporte, energía y gestión de residuos. Los datos se fundamentan en un enfoque basado en procesos, lo que implica modelar los procesos individuales involucrados en la producción de un producto o la prestación de un servicio. Esto proporciona una notable flexibilidad para modelar diversos escenarios en evaluaciones del ciclo de vida.

III.4.3. Metodología TRACI 2.1

El procedimiento de evaluación de impacto TRACI (instrumento para la minimización y análisis de impactos ambientales y químicos) se constituyó como un conjunto integral de categorías y factores de impacto medioambiental empleado en análisis del ciclo de vida (ACV). Este método, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), busca analizar los impactos ambientales de productos y procesos a través de diversas categorías específicas. La finalidad de TRACI es evaluar de manera sistemática y detallada los efectos ambientales a lo largo del ciclo de vida de productos y procesos en proyectos de investigación.

Respecto a la metodología TRACI implica:

- **Categorías de Impacto:** TRACI abarca una variedad de categorías que evalúan los efectos ambientales, como el agotamiento de recursos naturales, cambio climático, acidificación del agua y suelo, eutrofización, entre otras. Cada categoría refleja un aspecto específico del impacto ambiental.
- **Factores de Impacto:** En cada categoría, se emplean factores de impacto para medir la contribución relativa de un proceso o actividad particular a ese impacto específico. Estos factores son coeficientes que convierten las emisiones o el consumo de recursos en unidades comparables de impacto ambiental.
- **Evaluación de Ciclo de Vida (ACV):** TRACI se implementa Dentro del marco más extenso de la Evaluación de Ciclo de Vida, una metodología que examina minuciosamente los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

EN TANTO EL PROYECTO

Después de haber Recopilado el inventario del ciclo de vida, se seleccionó una metodología de cálculo de impactos, la cual permitió establecer y cuantificar las emisiones en relación con los posibles escenarios de impacto ambiental que podrían haberse originado.

Se optó por la metodología TRACI 2.1 (Metodología encargada del cuidado ambiental), la cual fue elaborada en EEUU, por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) desde el 2002. La elección se basó en su mayor adecuación al contexto presente en Piura.

Las categorías incluidas abarcaban la contaminación por agotamiento del ozono, el calentamiento global, los criterios de bienestar humano, la creación de smog, la acidificación y la eutrofización. La categoría de bienestar humano, a su vez, se desglosaban en contaminantes cancerígenos, no cancerígenos y otros contaminantes.

Cada una de estas mismas estaba asociada con una unidad de estudio. Dado que distintas sustancias generaron impactos similares, se emplearon estas unidades para

agregar los impactos y obtener un resultado por categoría. En el caso de la categoría de calentamiento global.

Sustancia Emitida	CO2 eq.
CO2	1.00
CH4	23.00
N2O	300.00

*Tabla N°01
Factores eq. De dióxido de carbono. Elaboración Propia.*

Acidificación (kg SO2eq.)

La acidificación se refiere a la reducción de la presencia de iones de carbonato (CO_3^{2-}), por otro lado, es un proceso en el cual el suelo y el agua experimentan la pérdida de su capacidad neutralizante como consecuencia de la emisión de gases contaminantes, como el NO (óxido de nitrógeno) y el SO₂ (dióxido de azufre). Estos gases, principalmente generados por la quema de combustible emitida por los vehículos.

Este problema conlleva consecuencias adversas para el bienestar humano, erosiona sustancias tóxicas, incrementa el índice de toxicidad en las aguas subterráneas, limitando su consumo, y modifica el PH de las capas freáticas, dañando la fauna marina.

Eutrofización (kg N eq)

Se define como la aparición excesiva de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, en los cuerpos de agua, lo cual estimula el incremento acelerado de vegetales, dando lugar a una acumulación de bioenergía. La cual obstruye la iluminación solar a las capas internas, provocando el declive de otro tipo de vegetación que contribuye como sustento para bacterias. Estas bacterias, a su vez, consumen oxígeno requerido para la existencia de vida acuática.

La eutrofización surge como resultado de acciones humanas, tales como la agricultura, la contaminación del aire con Sox (óxidos de azufre) y N (nitrógeno) que reaccionan con el agua atmosférica formando iones sulfato y nitrato, así como la contaminación del aire urbano, especialmente cuando los desechos no pasan por un proceso antes de llegar a los componentes de agua.

Cambio Climático Global (kg CO₂ eq)

Se refiere al aumento promedio de la temperatura en la atmósfera, lo cual puede provocar alteraciones en los modelos climáticos globales. Actualmente, se prefiere emplear el término "cambio climático" en lugar de "calentamiento global" para señalar que pueden producirse modificaciones en diversos aspectos del clima, más allá del simple aumento de la temperatura. Provocado principalmente por el aumento en las emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero), a causa del aumento de los combustibles fósiles, así como la pérdida de los sumideros naturales debido a cambios en el uso de la tierra y la deforestación.

La metodología empleada sigue las directrices establecidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 2003).

Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 equivalente)

La capa de ozono estratosférica actúa como un escudo protector alrededor del planeta, absorbiendo entre el 96% y el 98% de los rayos ultravioleta del sol. No obstante, esta capa benévola se ha visto disminuida debido a la liberación de compuestos químicos como los clorofluorocarbonos (CFC) e hidroc fluorocarbonos (HCFC), empleados en refrigerantes, agentes espumantes, solventes y en la fabricación de extintores. Aunque se ratificó el Protocolo de Montreal hace veinte años con el propósito de disminuir la producción de dichas sustancias, el Perú aún emplea HCFC, situándose como una de las naciones con mayor exposición a la radiación globalmente. En abril del 2022, Piura registró niveles de radiación entre de 13.4 puntos y 16.8 puntos de radiación superando el límite permitido por la OMS (Organización Mundial de la Salud).

A nivel mundial, hay acuerdo en el uso del Potencial de Agotamiento del Ozono (PAO), una medida propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para evaluar la importancia relativa de las sustancias que pueden tener un impacto significativo en la degradación de la capa de ozono. Este consenso establece las pautas que TRACI utiliza en la formulación de la metodología de cálculo.

Formación de smog (kg O₃ eq)

Representa una forma de contaminación de la atmósfera que surge en áreas urbanas a causa de la liberación de agentes contaminantes y las condiciones climáticas predominantes. Los compuestos químicos producidos por el smog comprenden óxidos de nitrógeno y componentes orgánicos volátiles (COV). Estos, al entrar en contacto con la luz solar, generan ozono a nivel del suelo o troposférico.

Como consecuencia hacia el bienestar humano pueden manifestarse a través de dificultades respiratorias, incluyendo el agravamiento de síntomas asociados como asma, enfisema y bronquitis. La exposición prolongada al ozono puede resultar en daño pulmonar permanente. A nivel ecológico, se observan impactos que afectan diversos

ecosistemas y cultivos. Los automóviles son la principal fuente de precursores del ozono, junto con los suministros eléctricos y las instalaciones industriales.

TRACI ha adoptado la metodología desarrollada por Carter en el año 2000, la cual cataloga más de 1200 sustancias causantes de smog.

Salud Humana (kg PM_{2,5} eq)

Las partículas suspendidas en el ambiente, conocidas como particulados, tienen efectos adversos en la salud humana, contribuyendo a enfermedades respiratorias y, en casos extremos, a la mortalidad.

Estas partículas pueden ser liberadas directamente o formarse mediante procesos químicos en la atmósfera. Los precursores más frecuentes incluyen el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Las causas de emisión incluyen la quema de combustible (combustión), madera, así como el polvo proveniente de carreteras y campos. Los particulados se dividen en dos categorías: partículas gruesas inhalables, con diámetros que van desde 2.50 hasta 10 micrómetros, entre los que destaca el polvo presente en carreteras; y partículas menores a 2.5 micrómetros, denominadas partículas finas.

Para evaluar los efectos en la salud humana, se diseñó un modelo que considera la proporción de sustancia emitida que se anticipa será absorbida por una persona, considerando la aglomeración de aire y el porcentaje de la población expuesta. Se caracterizaron los componentes utilizando PM 2.5.

Sustancias Cancerígenas, no Cancerígenas y Eco toxicidad. (CTUh y CTUe)

Para la creación de un modelo globalmente consensuado llamado Eco Tox, se necesitó la participación de modelos como IMPACT 2002, BETR, EDIP, USES-LCA, WATSON y EcoSense. Dicho modelo es empleado por TRACI. Este modelo ha integrado

numerosas características de versiones anteriores y cuenta con la capacidad de evaluar el potencial de toxicidad de aproximadamente 3,000 tipos sustancias.

En el caso de la toxicidad, ya sea cancerígena o no cancerígena, se emplea CTU como unidad comparativa por cada kg de sustancia generada, la cual se relaciona con el daño al bienestar humano (CTUh). Por otro lado, la ecotoxicidad, se analiza el efecto adverso en las especies afectadas dentro de un ecosistema utilizando la unidad comparativa de toxicidad ecológica (CTUe).

Und. CTUh por kg. emitido = Casos de Enfermedad por kg. Emitido

Und. CTUe por kg. emitido = PAF x m³ x día por kg. emitido (PAF = potencial de la fracción de especies afectadas)

Actualmente en la ciudad de Piura solo se ha realizado un estudio epidemiológico.

III.5. Procedimiento

Como primer paso se identificó un título de investigación, a continuación, se establecieron los objetivos del estudio y se delimitó el alcance del análisis. Se identificaron los tipos de pavimentos evaluados los cuales fueron, 01 Pavimento articulado de concreto y 01 pavimento flexible, ambos ubicados en la ciudad de Piura con menos de 2 años de antigüedad, así como las fases del ciclo de vida que se consideraron, como la extracción de recursos naturales, la producción de materiales, la construcción, el uso y el mantenimiento, y el fin de vida.

Luego, mediante la técnica de observación cuantitativa se recopiló datos correspondientes a los flujos de entrada y salida de cada fase del ciclo de vida del pavimento. La muestra se tomó a través de una selección aleatoria, utilizando la técnica de muestreo probabilístico. Mediante el manejo de del software OPENLCA y la base de datos Ecoinvent V3 se analizaron los datos, esto incluye el consumo de energía, el uso de materiales, las emisiones atmosféricas, el consumo de agua y otros impactos ambientales relevantes.

Con base en los resultados y las interpretaciones del ACV se hizo la comparación de la carga ambiental de cada pavimento con lo cual se despejó la hipótesis propuesta en este proyecto.

Por último, se realizaron recomendaciones para la construcción y el mantenimiento de los pavimentos. Estas medidas incluyen el uso de materiales más sostenibles, la optimización del uso de recursos y energía, y la implementación de prácticas de gestión eficientes.

III.6. MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS

El cálculo de los resultados del Análisis del Ciclo de Vida se dió a través del uso del software **OpenLCA**, el cual estuvo apoyado por una base de datos que proporcionó al programa, información necesaria para el cálculo de emisiones provocadas por los componentes de un pavimento.

Las vías seleccionadas para la realización de los estudios pertenecen al distrito de Castilla y El distrito de Veintiséis de octubre, en la provincia de Piura, teniendo en común que ambos modelos comparten el mismo promedio de temperatura anual, un índice de trafico similar y las mismas características en el tipo de suelo. Piura tiene un clima subtropical, donde la temperatura anual promedio son 25 ° C.

III.7. ASPECTOS ÉTICOS

En la propuesta de investigación, se aplica la ética de los investigadores, a lo largo del proceso de la investigación, poniendo en práctica:

Toda investigación recolectada de fuentes externas, debe ser citada, dando el crédito a dichos autores, demostrando Honestidad.

En cuanto a la autoría, se garantizó que se citaran todas las ideas textuales y se registraran los nombres de los autores consultados, como lo establece las reglas internacionales (ISO).

En nuestra investigación se abarca los principios éticos, en busca de brindar una información confiable, promoviendo el bienestar de los participantes, evitando que se vean perjudicados de alguna por alguna mala práctica, en esta investigación se trató también el respeto por el criterio de actuar e independencia de los participantes, otro principio ético fundamental es la justicia, aplicándola en esta investigación de tal manera que se dé un aporte equitativo de parte de los participantes.

IV. RESULTADOS

4.1. Selección de las vías a ser estudiadas

Los pavimentos urbanos en la provincia de Piura se clasifican mayormente en dos tipos, pavimento flexible y articulado de concreto, para este estudio se buscó vías que compartan tres requisitos fundamentales, las mismas condiciones climáticas, características similares en el tipo de suelo y el mismo índice de tráfico vehicular.

El primer pavimento pertenece a la Av. Salvador Allende, anteriormente compuesta por una carpeta asfáltica, motivo por que fue reconstruida en los últimos años con un pavimento articulado, el siguiente pavimento pertenece a la Av. Las Flores recientemente reconstruida con una carpeta asfáltica de un espesor de 2 pulgadas.

Luego de la elección de los pavimentos, se procedió con la búsqueda de los expedientes técnicos, con el fin de obtener información detallada acerca de los estudios realizados.

4.2. Cuantificación de flujos y Análisis de Inventario

Con la información almacenada, se creó un archivo Excel donde se organizaron las entradas del sistema, con lo que se obtuvo un inventario de ciclo de vida de los mismos a través del análisis desarrollado en el software.

En las fases de ejecución se comparó los presupuestos obtenidos de los expedientes seleccionados con información de empresas dedicadas al rubro de la construcción con el fin de emplear materiales comúnmente no considerados en las partidas presupuestales, tomando como ejemplo el agua.

En las fases de operación, según CShub método utilizado para el cálculo del albedo arrojó una proporción de kg de emisiones negativas de CO₂. El pavimento articulado de concreto tiene una doble reducción en la cantidad de emisiones a comparación del pavimento asfáltico. sin bien ambos tenían una superficie asfáltica y fueron renovados, la capa de rodadura del pavimento de la Av. Salvador Allende, se cambió a pavimento articulado de concreto.

El consumo de combustible por rugosidad se analizó de acuerdo al tiempo de vida útil para lo que fueron diseñados, de acuerdo a los expedientes técnicos, 20 años de servicio.

Pavimento Asfáltico		
Variación de Albedo=	0.125	
Factor de reducción=	2.55	kg CO2 e/m2
Reducción (A)=	31.875	kg CO2 eq.
ADOQUINES		
Variación de Albedo=	0.25	
Factor de reducción(Efrf)=	2.55	kg CO2 e/m2
Reducción (B)=	63.75	kg CO2 eq.
Reducción Final (B-A)=	31.875	kg CO2 eq.
<i>Reflectancia solar (Albedo).Elaboracion Propia</i>		

*Tabla N°02
Valores eq. Del albedo en pavimentos.*

El pavimento adoquinado de concreto tuvo un IMDA vehicular entre 4001 y 6000. Es por ello que se tomó 3.5 m/km como Índice máximo de Rugosidad Inicial (Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014).

Tipo de Carretera	Rugosidad Característica Inicial Pavimento Nuevo IRI (m/km)	Rugosidad Característica Inicial Pavimento Reforzado IRI (m/km)	Rugosidad Característica Durante el Periodo de Servicio IRI (m/km)	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	2.00	2.50	3.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	2.50	3.00	4.00	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	3.00	3.50	4.50	Rugosidad característica, para una Confiabilidad de 85%

*Tabla N°03
Índice de Rugosidad Admisible (Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos)*

De acuerdo a los valores de IRI, se calculó el consumo agregado de combustible a causa del incremento de rugosidad, considerando el consumo promedio y el porcentaje promedio que arrojó el esquema elaborado en la investigación de Zaabar en el año 2010.

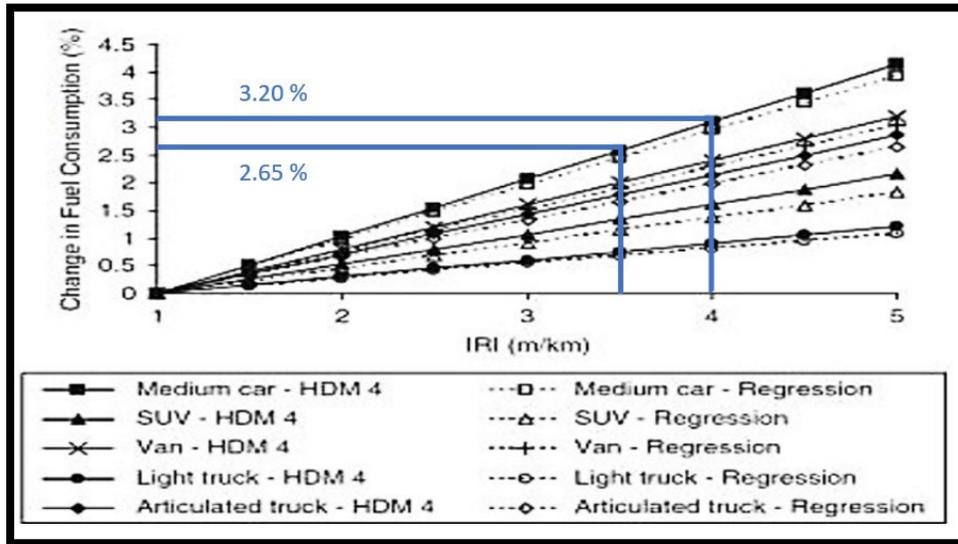


Figura 1. Consumo de combustible respecto al Índice de rugosidad. (ZAABAR 2010)

A continuación, se muestran las fórmulas utilizadas en el cálculo del consumo de Gasolina y Diesel por /km transitado durante el tiempo de vida útil de ambos pavimentos.

$$\text{Consumo adicional de gasolina (Gls)} = \frac{\text{Aumento de Consumo (Gls/km)}}{2} \times \frac{\text{IMDp}}{2} \times \frac{\text{Tiempo de Operación (días)}}{2} \times 0.89$$

$$\text{Consumo adicional de gasolina (Gls)} = \frac{\text{Aumento de Consumo (Gls/km)}}{2} \times \frac{\text{IMDp}}{2} \times \frac{\text{Tiempo de Operación (días)}}{2}$$

Tabla N°04

Cálculo del consumo de combustible. Elaboración propia.

En las tablas de datos mostradas anteriormente contienen los valores de las características de los pavimentos, como las condiciones climáticas, tipo de suelo de fundación y el índice del tráfico vehicular. Estos se detallaron en la descripción de los pavimentos seleccionados.

	Pavimento 1 Asfáltico	Pavimento 2 Articulado
IRI proyectado	4	3.5 m/km
Aumento Consumo	2.65%	3.20% %
Consumo Promedio	48.28	48.28 km/gal
Consumo Promedio	0.02071251	0.02071251 gal/km
Aumento Consumo	0.000539	0.000715 gal/km
Tiempo Operación	20	20 años
Tasa de crecimiento	4%	4% Veh
IMDp (Índice medio diario promedio)	3000	3000 Veh
Consumo rugosidad - Gasolina	539.33	738.05 Gls
Consumo rugosidad - Diesel	480	656.87 Gls
Ancho promedio Calzada	3	3
Consumo Rugosidad - Gasolina	0.18	0.25 Gls/m2
Consumo rugosidad - Diesel	0.16	0.22 Gls/m2

Gato de combustible por rugosidad. Elaboració propia.

Tabla N°05
Gasto de combustible por IRI.

4.3. Manejo del Software Open LCA 2.0

El análisis de información se trabajó con el software Open LCA 2.0.0 (Green Delta 2023), apoyado por dos bases de datos. ELCD Y Ecoinvent V3, las cuales cuentan con mas de 5000 procesos utilizables. Green Delta ofrece tanto para el software como paralas bases de datos seleccionadas, diversos instructivos, tutoriales de uso, manuales de instrucciones los cuales cuentan con ejemplos desarrollados paso a paso, facilitando su comprensión y desarrollo, debido a que el software y las bases de datos están en inglés, estos documentos antes mencionados influyeron en la elección de los programas a utilizar.

El software Open LCA 2.0.0 facilita el análisis del ciclo de vida de cualquier producto, ya que cuenta con el respaldo de una variedad de bases de datos que no solo brindan procesos concretos para cada actividad si no también permite exportar e importar información relevante al ciclo de vida. Entre las bases importadas al software tenemos ELCD donde su información y descarga es de libre acceso, a diferencia de Ecoinvent

V3 que para su manejo se necesita una licencia estudiantil ofrecida para un mes de uso.

El modelado de los flujos de un producto, se puede realizar por procesos unitarios o directamente por los procesos establecidos por el software, los procesos unitarios permiten asignar los flujos de referencia y crear una relación entre cada proceso considerado en el análisis de emisiones por etapa, facilitando la organización de los resultados arrojados por los mismos. A diferencia de los procesos del sistema, que, si bien el cálculo es más corto, al final del análisis arrojan los resultados en un solo conjunto, complicando la relación entre las emisiones presentes en cada proceso.

Este análisis se realizó por procesos unitarios, alcanzando así el tercer objetivo que buscó Comparar los impactos obtenidos entre ambos pavimentos y elegir la mejor opción desde una perspectiva ambiental.

Para la modelación y comparación de productos en el software Open LCA se requieren componentes esenciales donde se incluyen flujos, procesos, productos, sistemas y proyectos, los flujos de referencia constituyen la unidad fundamental, puede seleccionarse entre materiales o energía considerados como entradas (inputs) y como salidas (outputs) se selecciona entre emisiones o descargas generadas por los procesos.

En el Perú no se dispone de datos modelados específicamente en los procesos de producción de productos básicos como asfalto y cemento, es por ello que se tomó como opción recurrir a inventarios globales donde se seleccionó los flujos necesarios los que se adaptaron de acuerdo a nuestras necesidades de estudio. Los flujos de referencia utilizados se muestran en los anexos.

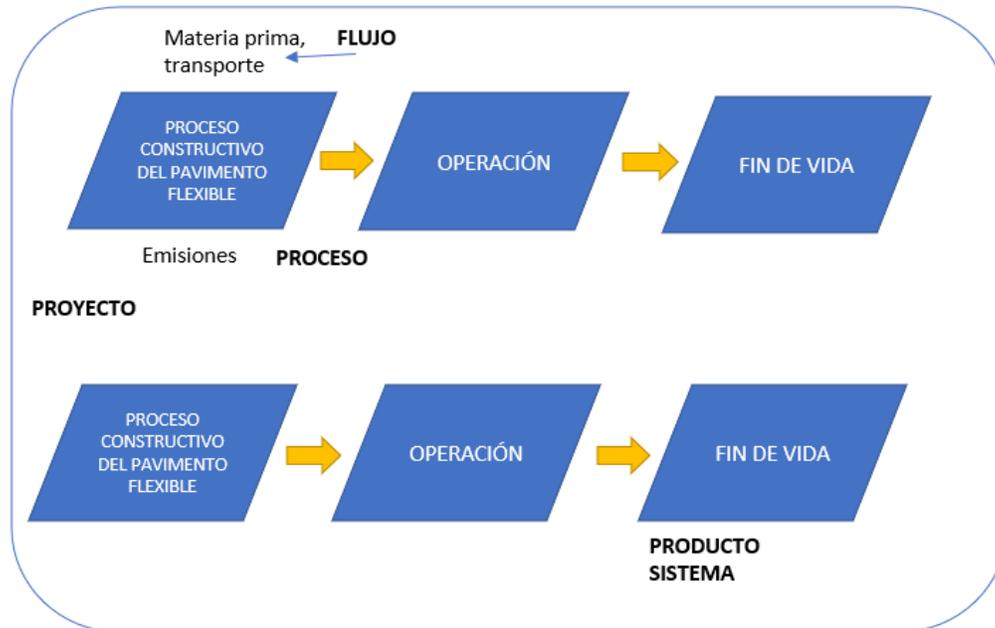


Figura 2. Creación de flujos y etapas en el software Open LCA 2.0.

4.4. Creación de flujos de referencia

En la utilización del programa, se empezó por la creación de los flujos de referencia que son las fases a evaluar en un pavimento, donde cada flujo servirá como punto de partida para continuar con el análisis de la siguiente etapa, todo este análisis se desarrolló teniendo como unidad de análisis un metro cuadrado del pavimento, como primer flujo se tuvo la fase de demolición donde se consideró un área sin pavimentar, conectándose así con el siguiente proceso unitario considerado, posicionamiento de la base granular. La última etapa tomada en cuenta fue la carpeta asfáltica, donde el pavimento estaría ya pavimentado.

New flow
Creates a new flow

Name: DEMOLICION

Description:

Flow type: Product

Reference flow property: Area

Finish Cancel

Figura 3. Creación de un nuevo flujo. Demolición, para ambos pavimentos.

New flow
Creates a new flow

Name: BASE GRANULAR

Description:

Flow type: Product

Reference flow property: Area

Finish Cancel

Figura 4. Creación de un nuevo flujo. Base Granular, para ambos pavimentos.

The screenshot shows a window titled "New flow" with the subtitle "Creates a new flow". The window contains the following fields and controls:

- Name:** A text input field containing "CARPETA ASFALTICA".
- Description:** A large text area that is currently empty.
- Flow type:** A dropdown menu with a gear icon, currently set to "Product".
- Reference flow property:** A dropdown menu with a gear icon, currently set to "Area".
- Buttons:** "Finish" and "Cancel" buttons located at the bottom right of the dialog.

Figura 5. Creación de un nuevo flujo Carpeta Asfáltica.

The screenshot shows a window titled "New flow" with the subtitle "Creates a new flow". The window contains the following fields and controls:

- Name:** A text input field containing "ARTICULADO".
- Description:** A large text area that is currently empty.
- Flow type:** A dropdown menu with a gear icon, currently set to "Product".
- Reference flow property:** A dropdown menu with a gear icon, currently set to "Area".
- Buttons:** "Finish" and "Cancel" buttons located at the bottom right of the dialog.

Figura 6. Creación de un nuevo flujo Carpeta Articulado de Concreto

Las siguientes imágenes presentadas muestran la relación de los procesos presentes en las categorías de recursos para la construcción, sistemas de fin de vida, etc. Cabe resaltar que las bases de datos seleccionadas cuentan con procesos no desarrollados según el lugar de estudio, debido a esto se opta por utilizar procesos empleados de investigaciones a nivel global. Por otro lado, muestran una descripción del proceso seleccionado, donde se asignó: nombre, descripción del desarrollo del proceso, método de cálculo, fecha de inicio y fin del proceso y la localidad donde se esté analizando.

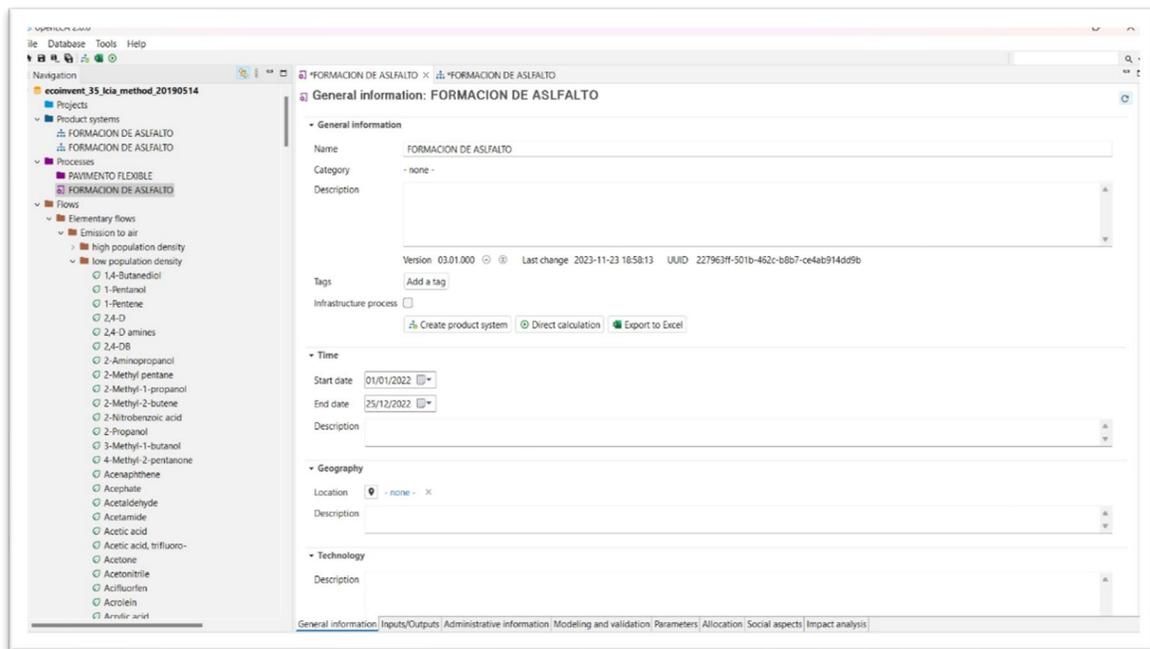


Figura 7. Creación de un nuevo proceso. Pavimento Asfáltico

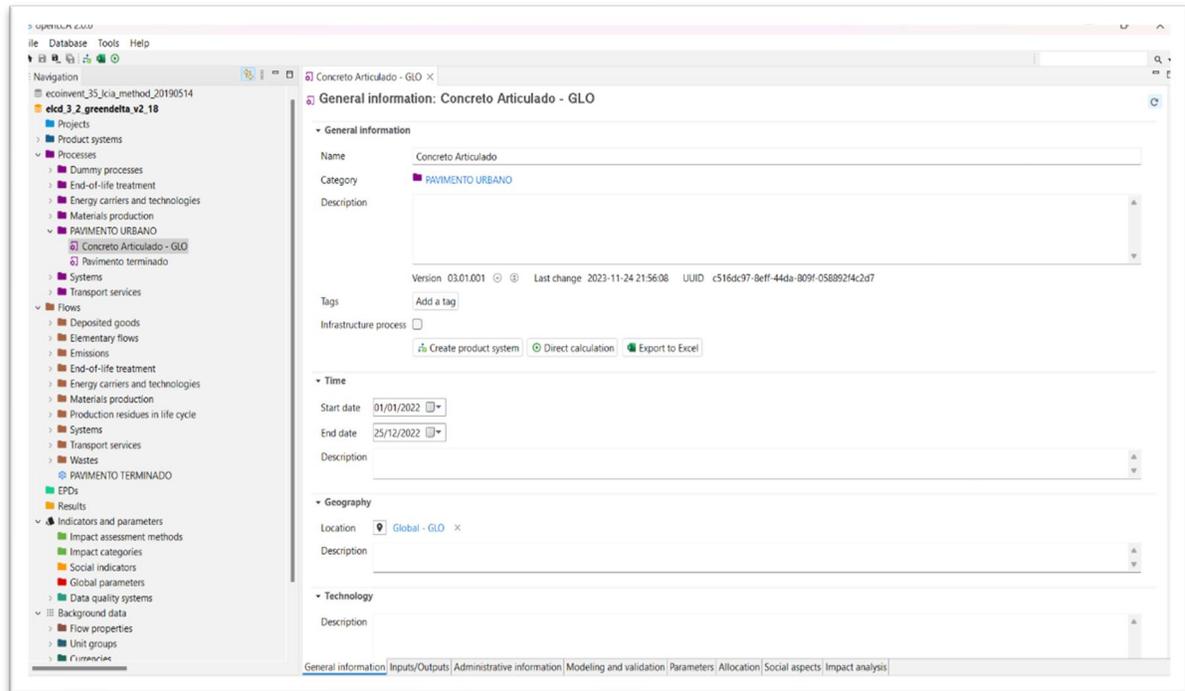


Figura 8. Creación de un nuevo proceso. Pavimento Articulado

Con el objetivo de facilitar en entendimiento del proceso constructivo de las fases de construcción de los pavimentos analizados, se establecieron los procesos unitarios a los flujos de referencia creados anteriormente.

Se procedió a integrar la información necesaria para cada proceso unitario creado anteriormente, como entradas y salidas del proceso, cálculo del metrado, bases de información y la aplicación de análisis de impacto.

Pavimento	Proceso Unitario	Etapas del procedimiento constructivo
Pavimento Flexible	Demolición del pavimento existente	Demolición de pavimento existente y eliminación
	Sub rasante y base granular	Extracción de material selecto de cantera.
		Perfilado, Nivelación, riego, compactado y conformación de subrasante.
		Transporte de material selecto en cantera
		Conformación de base granular
	Carpeta Asfáltica	Producción de MC -30 y RC -250
		Extracción de material selecto de cantera.
		Transporte de material a pie de obra
		Riego de imprimación
		Colocación de carpeta asfáltica

Pavimento Articulado	Demolición del pavimento existente	Demolición de pavimento existente
	Sub rasante y base granular	Extracción de material selecto de cantera.
		Perfilado, Nivelación, riego, compactado y conformación de subrasante.
		Transporte de material selecto en cantera.
		Conformación de base granular
	Articulado	Extracción y Transporte de material selecto de cantera.
		Producción y transporte de cemento y elementos prefabricados (adoquines y sardineles)
		Colocación de cama de arena
		Colocación de los adoquines
		Sardineles de concreto prefabricado
Elementos de arriostre vaciados in situ.		
Colocación de sello de arena		

Tabla N°06

Creación de etapas para cada proceso unitario. Pavimento Articulado. Elaboración propia

En la siguiente imagen se mostró las entradas y salidas del proceso unitario creado en el software Open LCA, en la parte superior se describió las entradas (inputs) consideradas para la operación de pavimento adoquinado, entre las cuales se encuentra el flujo de referencia precedente y los combustibles considerados. En segundo lugar, se describió las salidas utilizadas (outputs), siendo estas las emisiones emitidas a causa de la reflectancia solar (albedo), de la combustión y el flujo de referencia precedente al proceso. Se consideró como unidad practica el m2 de pavimento en el análisis desarrollado.

Todo proceso cuenta con una descripción, en esta parte se describió el nombre asignado, la extensión de la influencia del proceso, la tecnología empleada, la localización geográfica, aspectos sociales, etc.

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality ...	Description
F ₂ A Pavimento intertrabado	Pavimento Urbano	1.00000	m ²		none		P 3 A Adoqu...		
F ₂ diesel - PE	Energy carriers and technolo...	0.21000	gal (US liq)		none		P Diesel, co...		
F ₂ gasoline (regular)	Energy carriers and technolo...	0.24000	gal (US liq)		none		P Gasoline (r...		

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data quality ...	Description
F₂ A Pavimento en uso	Pavimento Urbano	1.00000	m²		none				
F ₂ Ammonia	Emission to air/low populati...	1.00000E-5	kg		none				Diesel com...
F ₂ Benzene	Emission to air/low populati...	1.00000E-5	kg		none				Diesel com...
F ₂ Benzene	Emission to air/low populati...	0.00950	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	2.08000	kg		none				Diesel com...
F ₂ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	1.84200	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Carbon dioxide, fossil	Emission to air/low populati...	-31.88000	kg		none				Disminucio...
F ₂ Carbon monoxide, fossil	Emission to air/low populati...	0.00543	kg		none				Diesel com...
F ₂ Carbon monoxide, fossil	Emission to air/low populati...	0.63300	kg		none				Petrol (gasolina) c
F ₂ Dinitrogen monoxide	Emission to air/low populati...	0.00012	kg		none				Diesel com...
F ₂ Dinitrogen monoxide	Emission to air/low populati...	0.00013	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Heat, waste	Emission to air/low populati...	30.27000	MJ		none				Diesel com...
F ₂ Heat, waste	Emission to air/low populati...	27.69000	MJ		none				Petrol (gas...
F ₂ Lead	Emission to air/low populati...	0.00010	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Methane	Emission to air/low populati...	0.00013	kg		none				Diesel com...
F ₂ Methane	Emission to air/low populati...	0.00180	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Nitrogen oxides	Emission to air/low populati...	0.02790	kg		none				Diesel com...
F ₂ Nitrogen oxides	Emission to air/low populati...	0.01230	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ NMVOC, non-methane volatile organ...	Emission to air/low populati...	0.00180	kg		none				Diesel com...
F ₂ NMVOC, non-methane volatile organ...	Emission to air/low populati...	0.01090	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Particulates, < 2.5 um	Emission to air/low populati...	0.00290	kg		none				Diesel com...
F ₂ Particulates, < 2.5 um	Emission to air/low populati...	0.00302	kg		none				Petrol (gas...
F ₂ Sulfur dioxide	Emission to air/low populati...	0.00070	kg		none				Diesel com...

Figura 9. Entradas y salidas para pavimento Articulado. Software Open LCA.

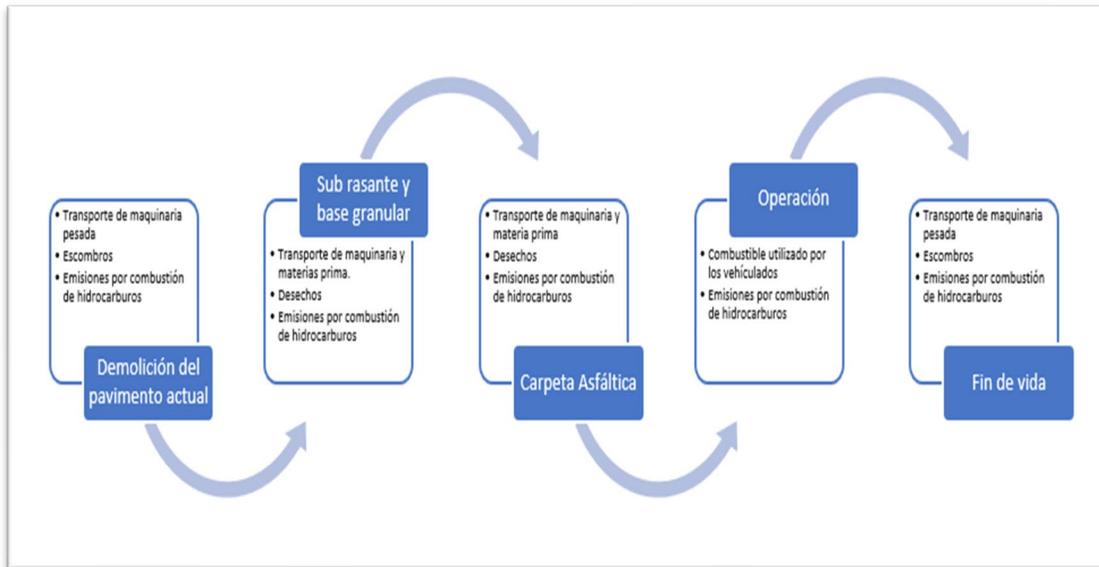


Figura 10. Flujos de proceso para pavimento flexible. Elaboración propia

Las entradas empleadas en los procesos de ambos pavimentos se muestran en los anexos.

De acuerdo al método de impacto utilizado se muestran las emisiones producidas durante el ciclo de vida de ambos pavimentos.

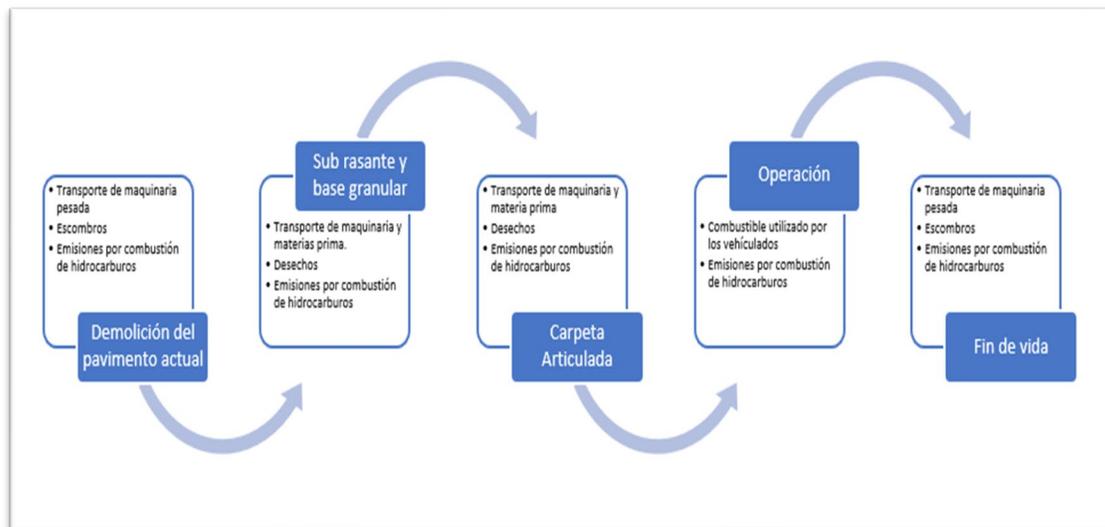


Figura 11. Flujos de proceso para pavimento articulado. Elaboración propia.

4.5. Elaboración del ciclo de vida

Se inició con la elaboración de ciclo de vida, como primer paso se creó un nuevo producto de sistema para ambos pavimentos donde es necesario asignar un proceso unitario de acuerdo a la relación con su flujo de referencia.

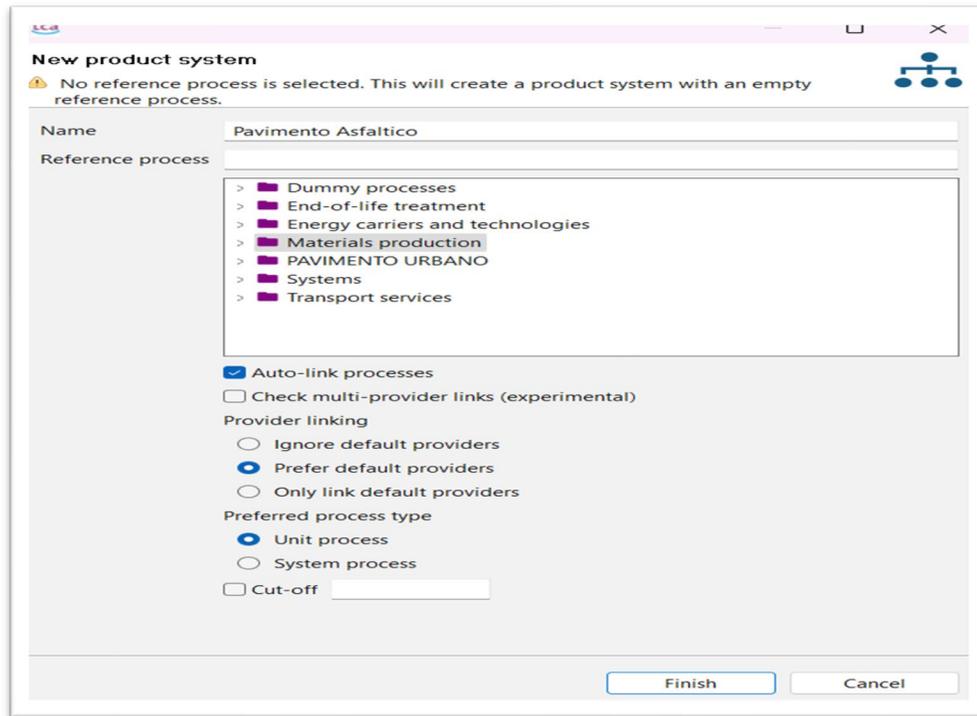


Figura 12. Creación de un nuevo producto de sistema para pavimento flexible.

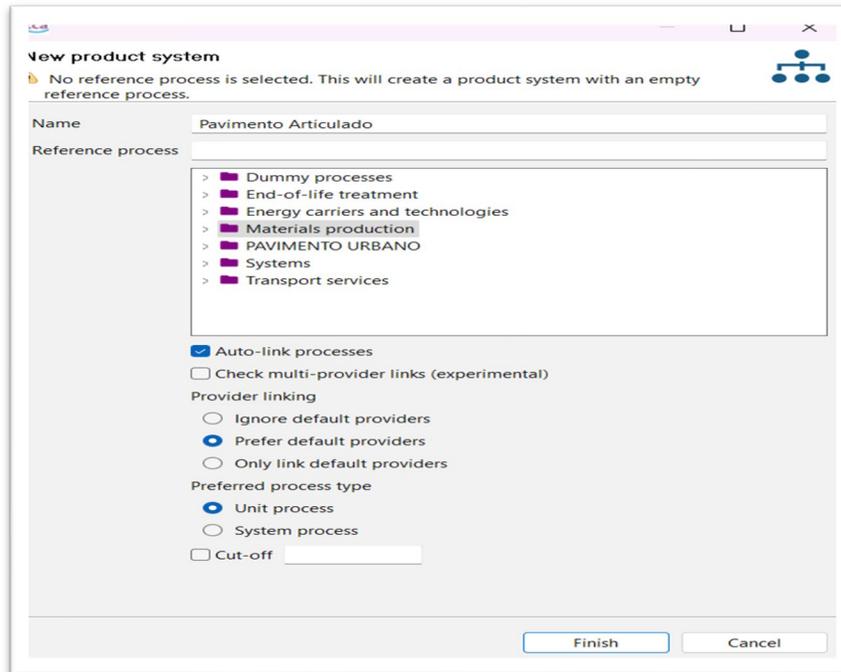


Figura 13. Creación de un nuevo producto de sistema para pavimento articulado.

En la sección inferior aparecen las alternativas de vinculación de proveedores y tipo de proceso, en la primera se seleccionó proveedores predeterminados teniendo en cuenta las emisiones generadas en los procesos precedentes. En la segunda opción debido a que los procesos analizados guardan relación con los flujos de referencia asignados se selecciona procesos unitarios.

4.6 Caracterización

El software de análisis del ciclo de vida Open permite el acceso de una variedad de metodologías de evaluación de impactos ambientales, entre las más completas se encuentra TRACI 2.1, la cual fue empleada en este análisis del ciclo de vida de pavimento flexible y articulado de concreto.

En la siguiente imagen se muestra la selección de la metodología TRACI 2.1 para las propiedades de cálculo.

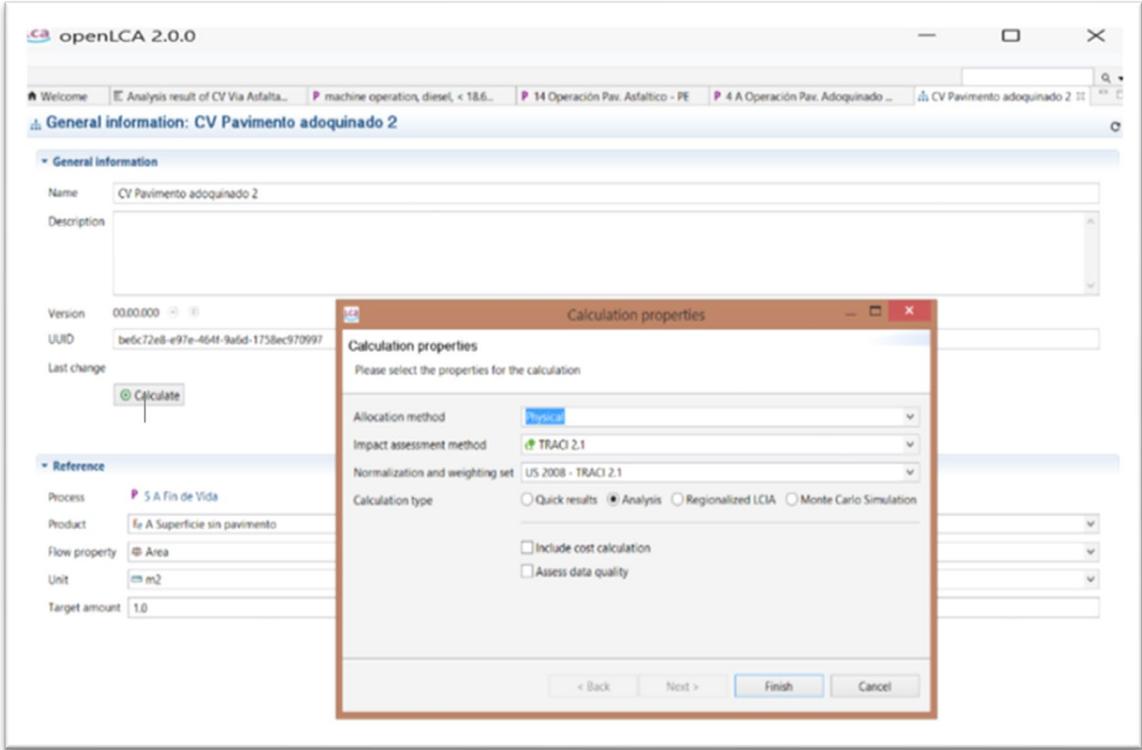


Figura 14. Aplicación de la metodología de impacto TRACI 2.1.

4.7 Resultados del análisis en el Software Open LCA

Los hallazgos derivados de la evaluación del inventario del ciclo de vida de los pavimentos. según TRACI 2.1 se presentaron a través de tablas, donde se distingue los procesos del ciclo de vida y la categoría de impacto de ambos pavimentos. Desde el software se exportó los resultados en una hoja Excel.

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
▲ Ozone depletion - TRACI 2.1				2.15971E-8	kg CFC...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			1.30466E-8	kg CFC...
▶ Diesel, consumption mix, at refinery, from crude oil, 200 ppm sul	Energy carriers and technologies / Crud...			5.38888E-9	kg CFC...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			3.16164E-9	kg CFC...
▲ Carcinogenics - TRACI 2.1				5.21085E-8	CTUh
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312:Site preparation			4.57398E-8	CTUh
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			2.73738E-9	CTUh
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			1.58880E-9	CTUh
▶ Diesel, consumption mix, at refinery, from crude oil, 200 ppm sul	Energy carriers and technologies / Crud...			1.27916E-9	CTUh
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			7.53094E-10	CTUh
▲ Smog - TRACI 2.1				9.07612	kg O3 eq
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312:Site preparation			9.45150	kg O3 eq
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			0.39532	kg O3 eq
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			0.18660	kg O3 eq
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			-1.00344	kg O3 eq
▲ Respiratory effects - TRACI 2.1				0.01554	kg PM2...
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312:Site preparation			0.02038	kg PM2...
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			0.00092	kg PM2...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			0.00034	kg PM2...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			0.00025	kg PM2...
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			-0.00649	kg PM2...
▲ Global warming - TRACI 2.1				51.29395	kg CO2 ...
▶ machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor - GLO	4312:Site preparation			91.65801	kg CO2 ...
▶ 4 A Operación Pav. Adoquinado - PE	Pavimento urbano			27.83525	kg CO2 ...
▶ Excavator, technology mix, 100 kW, Construction - GLO	Transport services / Other transport			3.69060	kg CO2 ...
▶ Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight,	Transport services / Road			1.43191	kg CO2 ...
▶ Gasoline (regular), consumption mix, at refinery, from crude oil, 1	Energy carriers and technologies / Crud...			0.82642	kg CO2 ...
▶ cement production, pozzolana and fly ash 15-40%, US only - GLO 2394	Manufacture of cement, lime and ...			-74.44757	kg CO2 ...
▶ Fossil fuel depletion - TRACI 2.1				0.00000	MJ surp...

Figura 15. Resultados del Software Open LCA

4.8. Comparación de resultados.

Una vez alcanzados los resultados emitidos por el programa, se comparó el porcentaje de emisiones generadas de ambos pavimentos.

De acuerdo a los datos brindados por el programa de análisis. Se realizó una comparación interna del impacto generado por el ciclo de vida de cada pavimento.

Por otro lado, se realizó una evaluación resumida teniendo en cuenta circunstancias probables del estado de un pavimento, modificando el IMDA, consumo de combustible por rugosidad tipo de suelo y condiciones climáticas.

4.9 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.9.1 INDICADORES AMBIENTALES TRACI 2.1

Según la metodología TRACI 2.1 desarrollada para emplearse en el análisis del ciclo de vida de cualquier producto con el fin de proteger al ambiente, se muestra el alcance de los impactos potenciales de los pavimentos analizados.

4.9.2 Pavimento Asfáltico.

Para el primer ejemplo, pavimento con una capa de rodadura conformada de asfalto. Se realizó una separación de los resultados obtenidos durante la fase constructiva y a lo largo del ciclo de vida. Se elaboró dos tablas o cuadros de resultados, la primera muestra la categoría de impacto y los procesos de (demolición, base granular y asfaltado) que conformaron la etapa constructiva. La segunda muestra de manera general la categoría de impacto y las etapas de (construcción, operación y fin de vida) que formaron parte del ciclo de vida del pavimento asfáltico.



Categoría de impacto	Demolición		Base Granular		Asfalto		Total
Acidificación(kg SO2 eq)	0.0037	0.32%	0.1389	11.89%	1.0326	87.86%	1.175
Sust. Cancerígenas (CTUh)	6.27E-10	0.07%	2.06E-08	2.31%	8.69E-07	97.62%	8.902E-07
Ecotoxicidad (CTUe)	0.0245	0.09%	0.7828	2.90%	26.1732	97.01%	26.9805
Eutrofización (kg N eq)	0.0002	0.62%	0.0087	22.93%	0.0291	76.45%	0.038
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	1.2479	1.86%	44.7318	66.57%	21.2138	31.57%	67.1935
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	6.98E-09	0.61%	2.34E-07	20.48%	9.02E-07	78.91%	1.143E-06
Agotamiento Ozono(kg CFC-11eq)	8.64E-11	2.41%	1.92E-09	53.48%	1.58E-09	44.11%	3.586E-09
Efectos Respiratorios(kg PM2.5 eq)	0.0003	0.39%	0.0101	14.03%	0.0613	85.58%	0.072
Smog (kg O3 eq)	0.1296	0.97%	4.6505	34.97%	8.5192	64.06%	13.299

*Tabla N°07
Impacto ambiental en la etapa de construcción para pavimento flexible.
Elaboración propia.*

También se creó un gráfico de barras para cada tabla, en el primer grafico de muestra los flujos de referencia que más emisiones generaron durante la construcción del pavimento. El flujo carpeta asfáltica y base granular contienen el mayor porcentaje de emisiones, en el primero se generó debido al uso del bitumen asfaltico el cual cuenta con una gran cantidad de VOC (compuestos orgánicos volátiles) principales agentes contaminantes que ponen en riesgo la salud. En el segundo flujo, la mayor cantidad de emisiones fue generada por las categorías de agotamiento de ozono y calentamiento global, estas causados por las emisiones generadas por la maquinaria utilizada, iniciando desde que la extracción y transporte de material.

Durante el total del Ciclo de Vida, el mayor índice de contaminación ambiental es generado en la etapa de construcción, donde las categorías de acidificación, sustancias cancerígenas, ecotoxicidad, eutrofización, calentamiento global y la formación de smog generaron más del 75 % del impacto ambiental en dicha etapa. Por otro lado, se determinó que la segunda etapa con mayor impacto ambiental es la de operación con un 23 % de impacto generado por las categorías de agotamiento de ozono, efectos respiratorios y sustancias no cancerígenas. La última etapa que se analizó fue el fin de

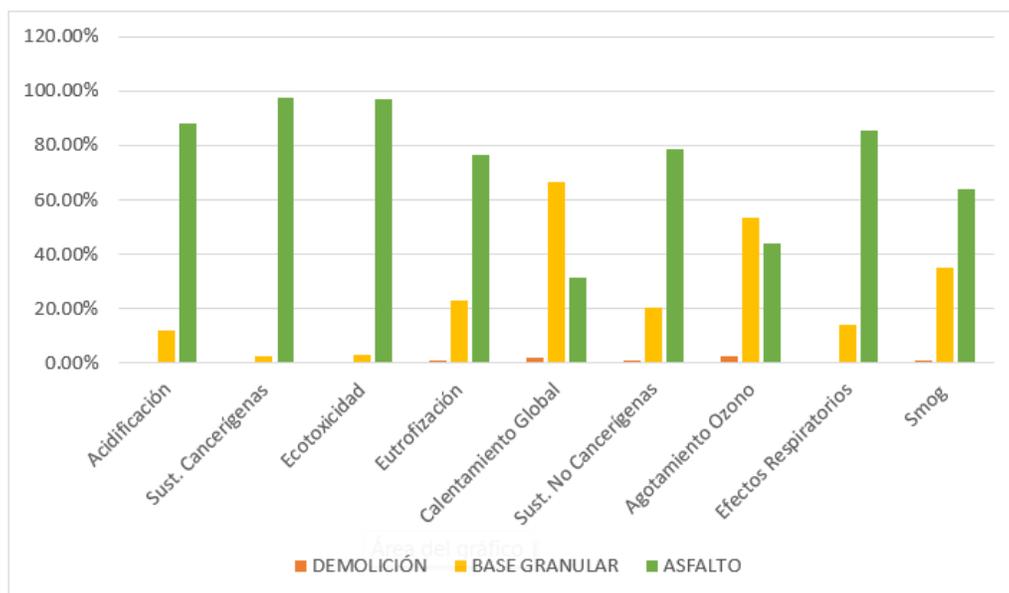


Figura 16. Índice de impacto ambiental en la etapa de construcción de un pavimento flexible.

vida del pavimento donde la única categoría que genera emisiones es la de agotamiento de ozono.

Categoría de impacto	Construcción		Operación		Fin de vida		Total
Acidificación (kg SO2 eq)	1.175	97.88%	0.025	2.07%	0.001	0.05%	1.201
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.90E-07	99.39%	5.38E-09	0.60%	8.96E-11	0.01%	8.955E-07
Ecotoxicidad (CTUe)	26.98	99.27%	0.196	0.72%	0.003	0.01%	27.179
Eutrofización (kg N eq)	0.038	96.27%	0.001	3.64%	0	0.09%	0.039
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	67.1930	94.77%	3.609	5.09%	0.099	0.14%	70.901
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.14E-06	54.00%	9.73E-07	45.98%	4.23E-10	0.02%	2.113E-06
Agotamiento Ozono(kg CFC-11eq)	3.59E-09	27.00%	9.59E-09	72.17%	1.10E-10	0.83%	1.329E-08
Efectos Respiratorios(kg PM2.5 eq)	0.0720	46.06%	0.084	53.92%	3.11E-05	0.02%	0.156
Smog (kg O3 eq)	13.299	94.40%	0.773	5.49%	0.015	0.11%	14.087

*Tabla N°08
Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento flexible.
Elaboración Propia.*

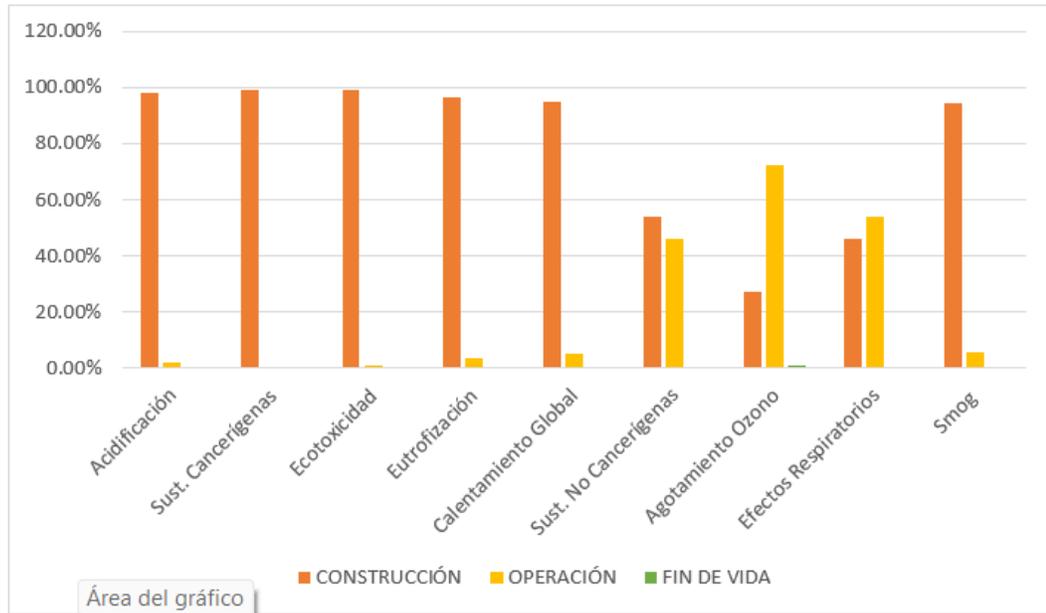


Figura 17. Índice de Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento flexible.

4.9.3 Pavimento Articulado de Concreto

Para el segundo ejemplo, pavimento articulado de concreto. Los resultados del análisis realizado en el software se organizaron en tablas y gráficos que se utilizaron para la comparación del impacto generado por las etapas de construcción, operación y fin de vida.

En este pavimento las actividades o procesos realizados en la etapa de base granular ocasionan el mayor impacto ambiental abarcando más del 70% del impacto generado en la etapa de construcción, esto a casusa de las emisiones de combustible emitidas por la maquinaria utilizada en el transporte de materiales. Sin bien la colocación de adoquín se realiza de forma manual sin emplear maquinaria, existe un porcentaje de impacto ambiental el cual se debe al proceso de elaboración del cemento, la cantidad emisiones generadas por dicho proceso es de 781 kilogramos de CO₂ por tonelada de cemento producida. (Cembureau, 2016).

Categoría de impacto	Demolición		Base Granular		Articulado		Total
Acidificación (kg SO2 eq)	0.0054	3.28%	0.1368	83.19%	0.0223	13.53%	0.165
Sust. Cancerígenas (CTUh)	9.11E-10	3.59%	2.01E-08	79.40%	4.31E-09	17.00%	2.532E-08
Ecotoxicidad (CTUe)	0.0344	3.30%	0.7692	73.71%	0.2399	22.99%	1.044
Eutrofización (kg N eq)	0.0003	3.31%	0.0086	83.76%	0.0013	12.93%	0.010
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	1.8297	1.44%	43.719	34.48%	81.2476	64.08%	126.7963
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	1.04E-08	3.68%	2.28E-07	80.25%	4.56E-08	16.07%	2.840E-07
Agotamiento Ozono(kg CFC-11eq)	4.00E-11	0.38%	4.48E-09	42.18%	6.10E-09	57.45%	1.062E-08
Efectos Respiratorios(kg PM2.5 eq)	0.0004	3.43%	0.0098	83.03%	0.0016	0.02%	0.012
Smog (kg O3 eq)	0.1885	3.46%	4.5537	83.51%	0.7109	13.04%	5.453

*Tabla N°09
Impacto ambiental en la etapa de construcción para pavimento adoquinado.
Elaboración propia.*

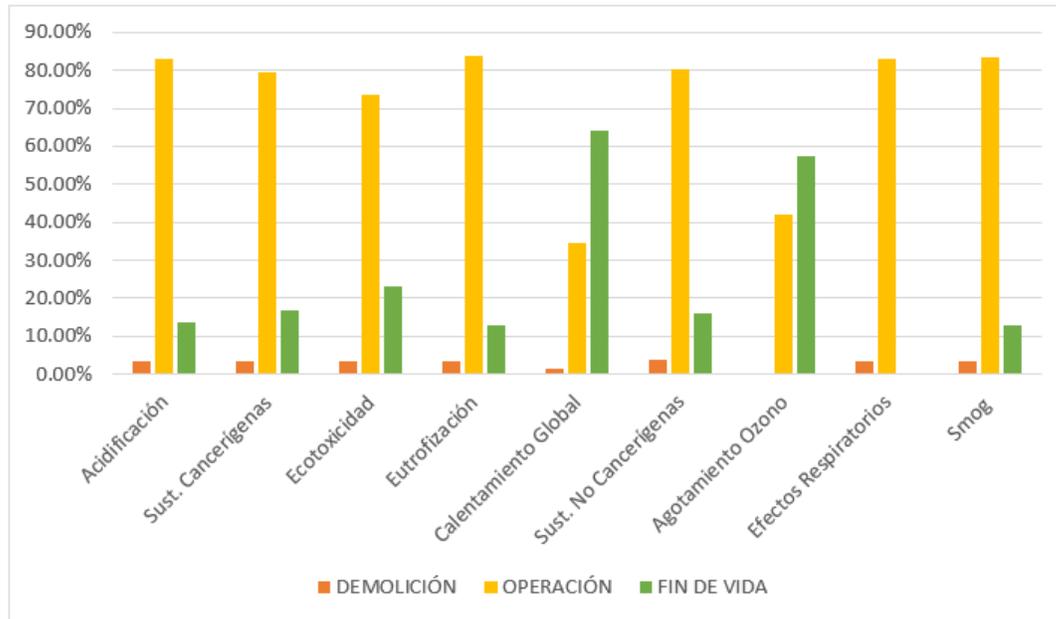


Figura 18. Índice de impacto ambiental en la etapa de construcción de un pavimento adoquinado. Elaboración propia.

En el ciclo de vida de un pavimento articulado de concreto, el mayor índice de impacto ambiental se genera en fase de construcción, esto generado por 9 categorías, entre las cuales encontramos 7 con mayor influencia. Acidificación, sustancias cancerígenas, ecotoxicidad, eutrofización, calentamiento global, efectos respiratorios y formación de smog, el promedio de contaminación de estas supera el 70%. Por otro lado, en la etapa de operación el porcentaje de contaminación es de 25%, el cual es resultado del impacto de las categorías analizadas, siendo las sustancias no cancerígenas y agotamiento de ozono las más impactantes. Para la fase de fin de vida de este pavimento al igual que el anterior genera la menor cantidad de impacto ambiental, siendo en este caso menor al 5% entre todas las categorías analizadas.

Categoría de impacto	CONSTRUCCIÓN		OPERACIÓN		FIN DE VIDA		Total
Acidificación (kg SO2 eq)	0.164	80.47%	0.034	16.66%	0.006	2.87%	0.204
Sust. Cancerígenas (CTUh)	2.54E-08	76.44%	6.87E-09	20.69%	9.54E-10	2.88%	3.3224E-08
Ecotoxicidad (CTUe)	1.043	77.80%	0.261	19.44%	0.037	2.76%	1.341
Eutrofización (kg N eq)	0.01	81.48%	0.002	15.60%	0	2.92%	0.012
Calentamiento Global (kg CO2 eq)	126.796	125.66%	-27.79	-27.54%	1.901	1.88%	100.907
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.84E-07	21.82%	1.01E-06	77.36%	1.07E-08	0.82%	1.305E-06
Agotamiento Ozono (kg CFC-11eq)	1.06E-08	44.46%	1.31E-08	54.65%	2.12E-10	0.89%	2.3912E-08
Efectos Respiratorios (kg PM2.5 eq)	0.0120	61.79%	0.007	33.99%	0.0004	2.22%	0.019
Smog (kg O3 eq)	5.4530	81.51%	1.038	15.51%	0.199	2.98%	6.690

Tabla N°10
Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento adoquinado.
Elaboración Propia.

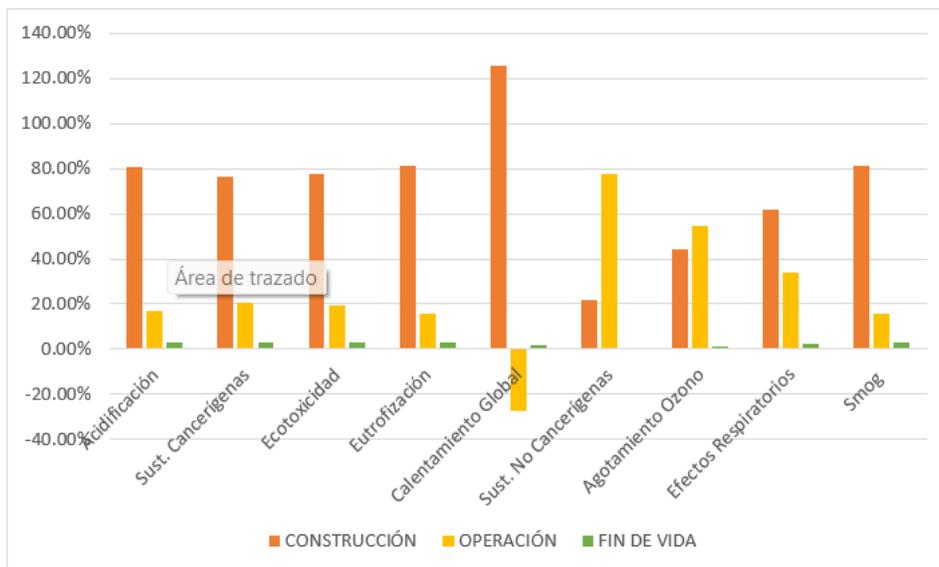


Figura 19. Índice de Impacto ambiental durante el ciclo de vida de un pavimento adoquinado.

4.9.4 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El análisis de impacto ambiental se realizó empleando dos tipos de pavimentos comúnmente usados en las carreteras de la región de Piura. Los cuales son una de los principales factores que ayudan al desarrollo socioeconómico de un país. Siendo el uso de estos mismos lo que incentivó el desarrollo de esta investigación.

De acuerdo a los resultados se describió y comparó el impacto generado por las categorías consideradas para cada pavimento.

4.9.5. DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DEL IMPACTO POR CATEGORÍA

4.9.5.1 Formación de Smog.

Entre las categorías medidas en Kg se encuentra la formación de smog. Según el análisis del software se presenta con mayor índice en la etapa de construcción de un pavimento flexible, superando por 7.85 kg la cantidad de smog generado en la etapa de construcción de un pavimento articulado.

Por otro lado, en la etapa de operación de un pavimento articulado, la formación de smog tiene un mayor índice a comparación de la etapa de operación de un pavimento flexible, con una diferencia de 0.389 kg respectivamente

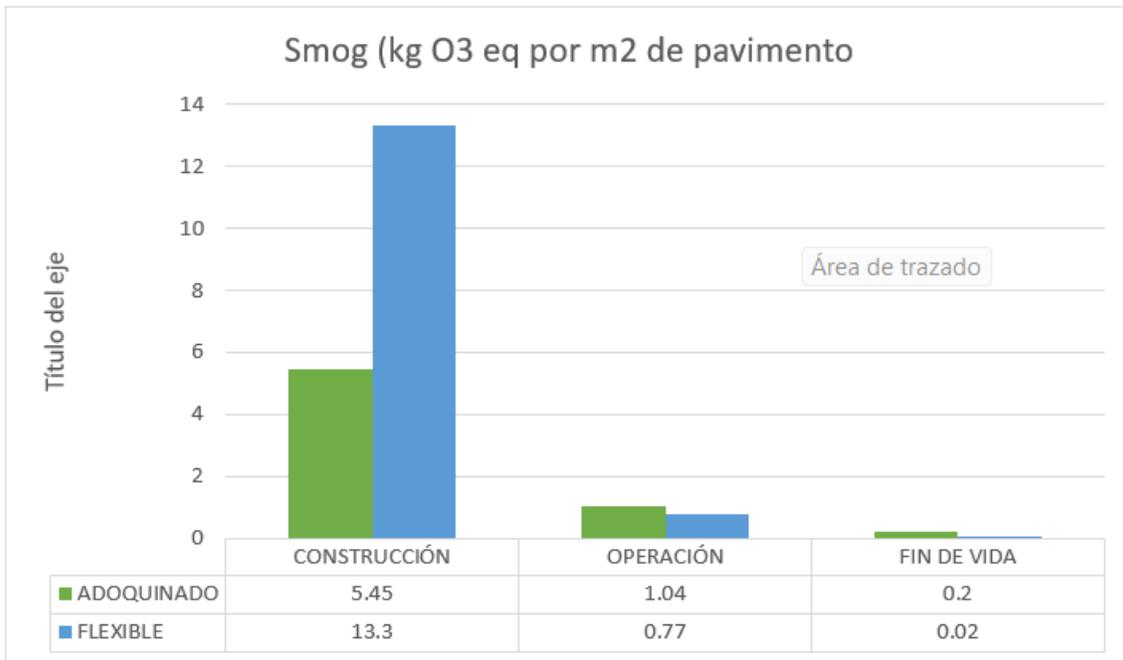


Figura 20. Formación de smog en ambos pavimentos. (Elaboración propia).

4.9.5.2 Calentamiento Global

La etapa de construcción de ambos pavimentos, fue la fase donde se generó mayor cantidad de emisiones, sin embargo, en el pavimento articulado esta etapa supera por 59.61 kg de CO₂ a la de un pavimento flexible, debido a la construcción y combustión durante el proceso de elaboración.

En la etapa de operación el pavimento con mayor índice de emisiones es el pavimento flexible con 3.61 kg de CO₂. Por otro lado, el pavimento articulado reduce sus emisiones generadas debido a su reflectancia.

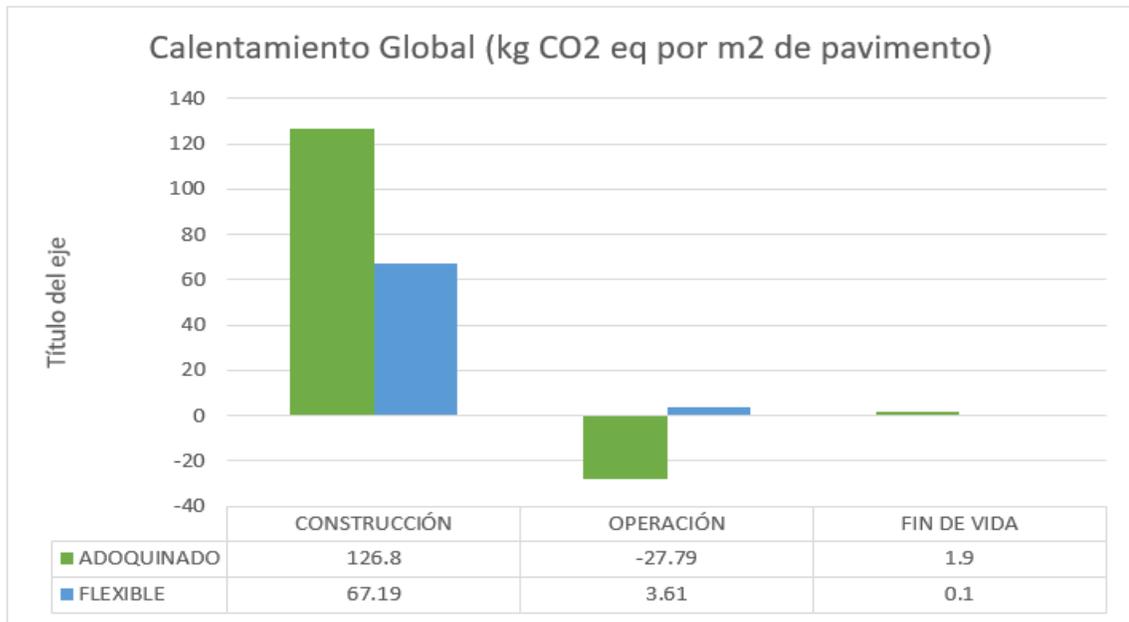


Figura 21. Calentamiento global para ambos pavimentos. Elaboración propia.

Para la etapa de fin de vida el vía de adoquín supera por 0.90 kg CO2 al pavimento de asfalto.

4.9.5.3 Agotamiento de ozono

En esta categoría el impacto generado en las fases de construcción, operación y fin de vida de ambos pavimentos es mínimo. De la comparación de dichos porcentajes se determinó que el porcentaje de emisiones generadas en el ciclo de vida de una vía adoquinada supera en un 60% a la de un pavimento flexible

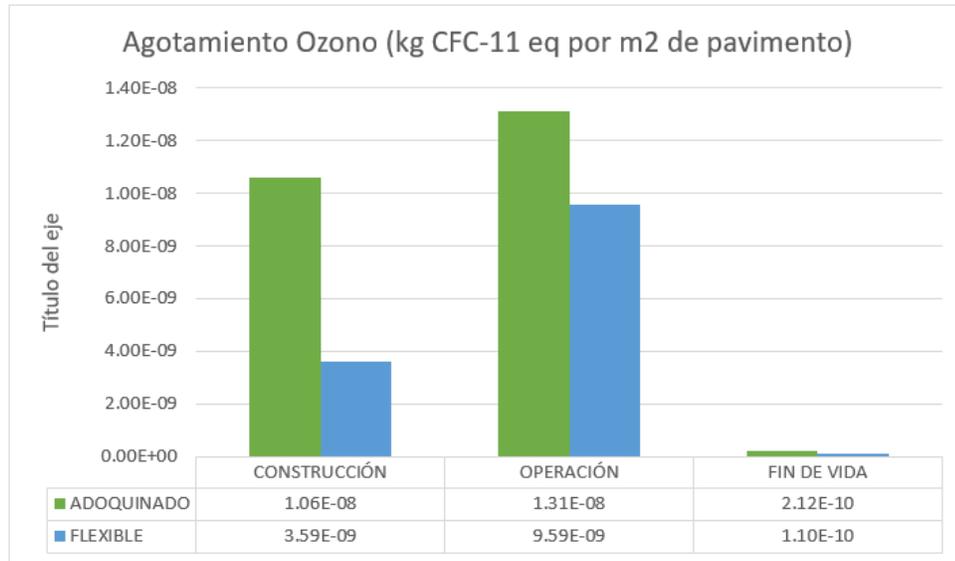


Figura 22. Agotamiento de ozono para ambos pavimentos. Elaboración propia.

4.9.5.4. Acidificación

Esta categoría se presenta con mayor frecuencia en la etapa de construcción de un pavimento flexible la cual supera en un 70% a la de un pavimento articulado. Esto a causa del manejo del bitumen que conforma la carpeta asfáltica.

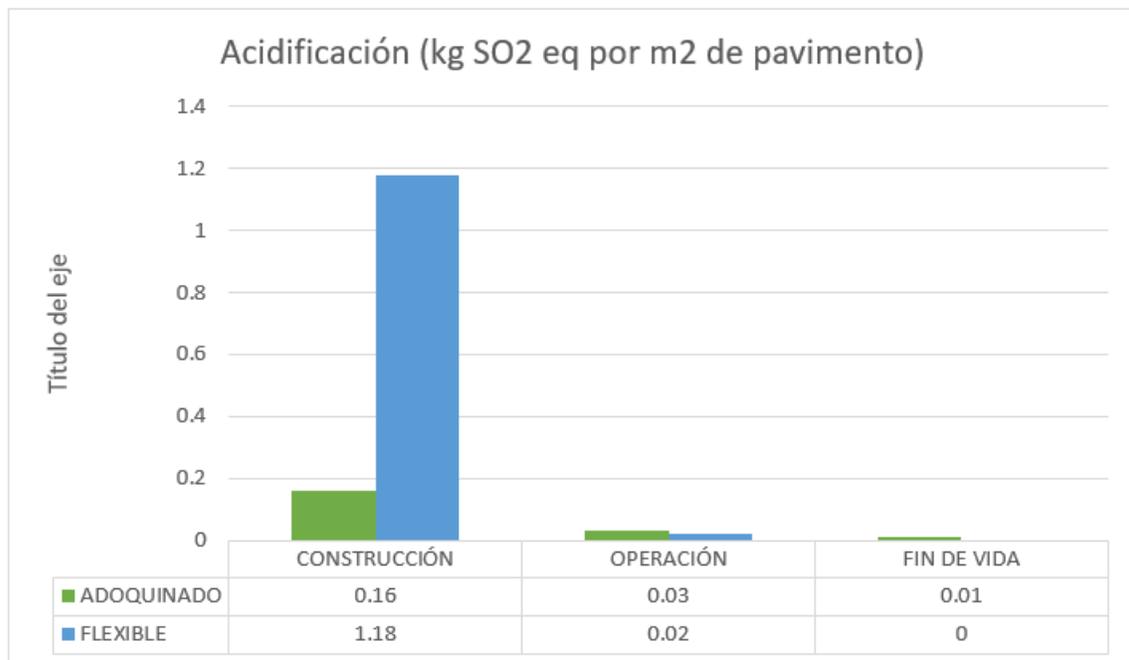


Figura 23. Acidificación para ambos pavimentos. Elaboración Propia.

4.9.5.5. Ecotoxicidad

Se determinó que la mayor cantidad de ecotoxicidad se genera en la etapa de construcción de un pavimento flexible, con un 90% más que lo producido por la fase de construcción de un pavimento articulado de concreto. En las dos etapas restantes el porcentaje de ecotoxicidad es mínimo.

La ecotoxicidad es el resultado de mecanismos toxicológicos producidos por la liberación de sustancias, con un efecto directo sobre la salud del ecosistema. (Huella ambiental del café, 2021).

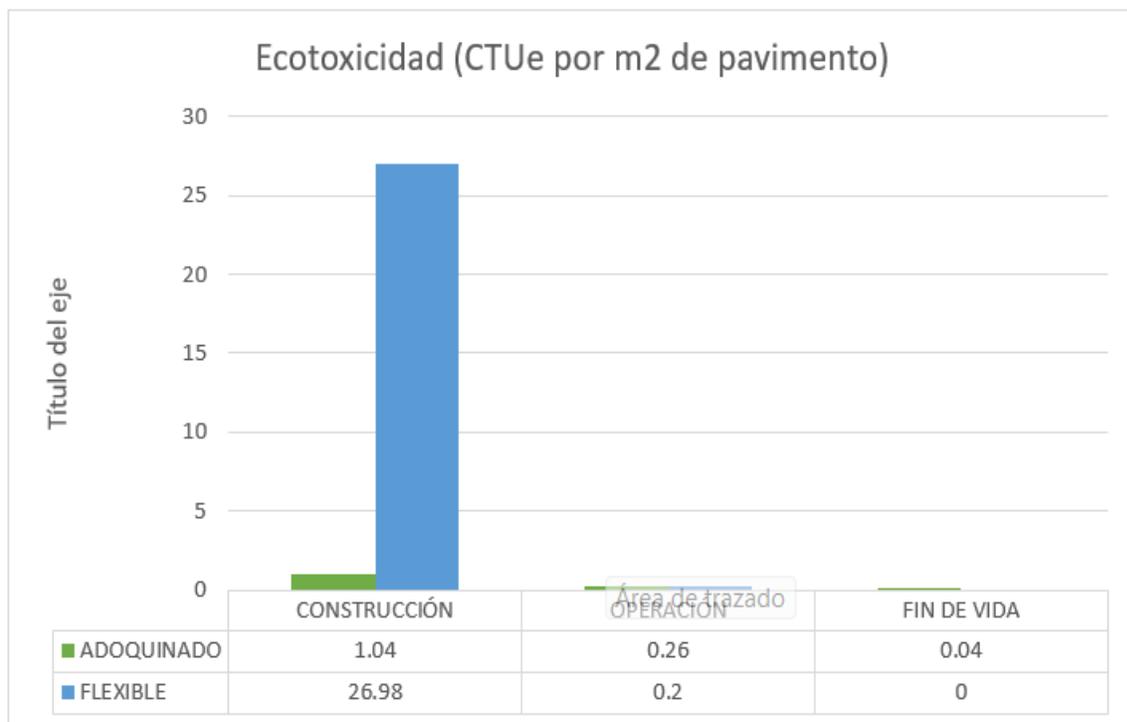


Figura 24. Ecotoxicidad para ambos pavimentos. Elaboración Propia.

4.9.5.6. Eutrofización

Los resultados obtenidos para esta categoría guardan relación con los mencionados anteriormente para la ecotoxicidad en la etapa de construcción, ya que esta etapa causa una mayor cantidad de eutrofización en un pavimento flexible, según el cálculo emitido por el software se genera 70% más de esta categoría en la construcción de una carpeta asfáltica, comparándola con una carpeta adoquinada.

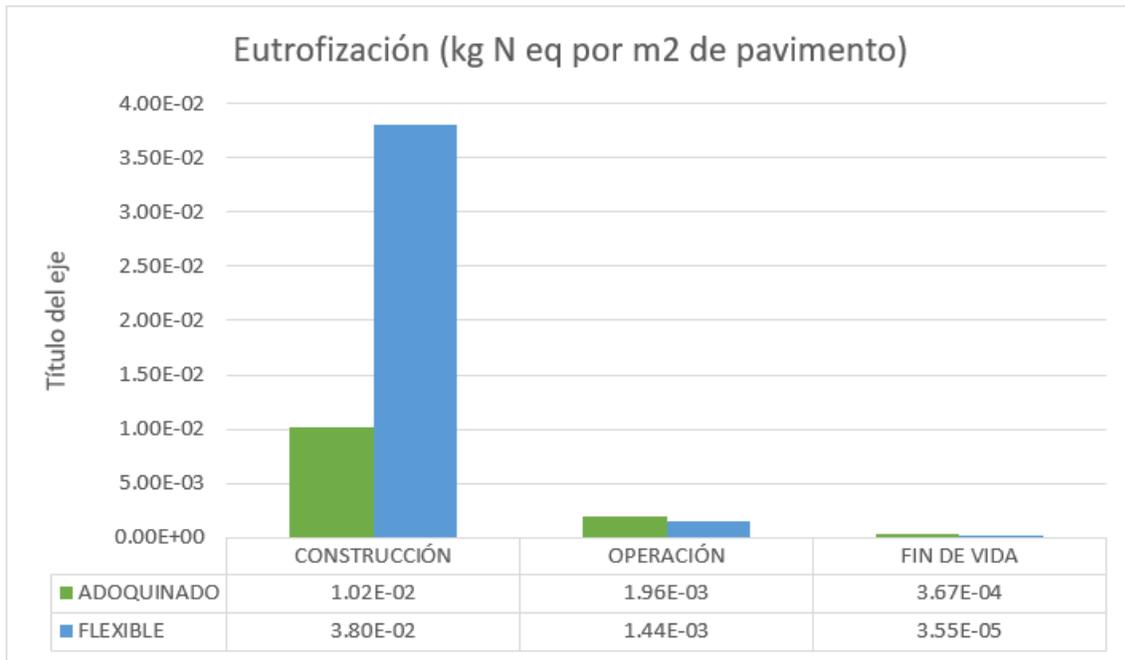


Figura 25. Eutrofización para ambos pavimentos. Elaboración Propia.

4.9.5.7. Indicadores del Bienestar Humano

En este punto, se han categorizado los factores relativos al bienestar humano, principalmente los que repercuten efectos respiratorios, cuantificados en kg de material particulado con un tamaño menor a 2.5 micrómetros, y que constituyen la problemática más acuciante. Durante la fase de construcción, las emisiones de SO₂ (dióxido de azufre), provenientes de las refinerías constituyen el 75% de los gases relacionadas con el pavimento flexible, continuado por las emanaciones generadas por la operación de maquinaria pesada.

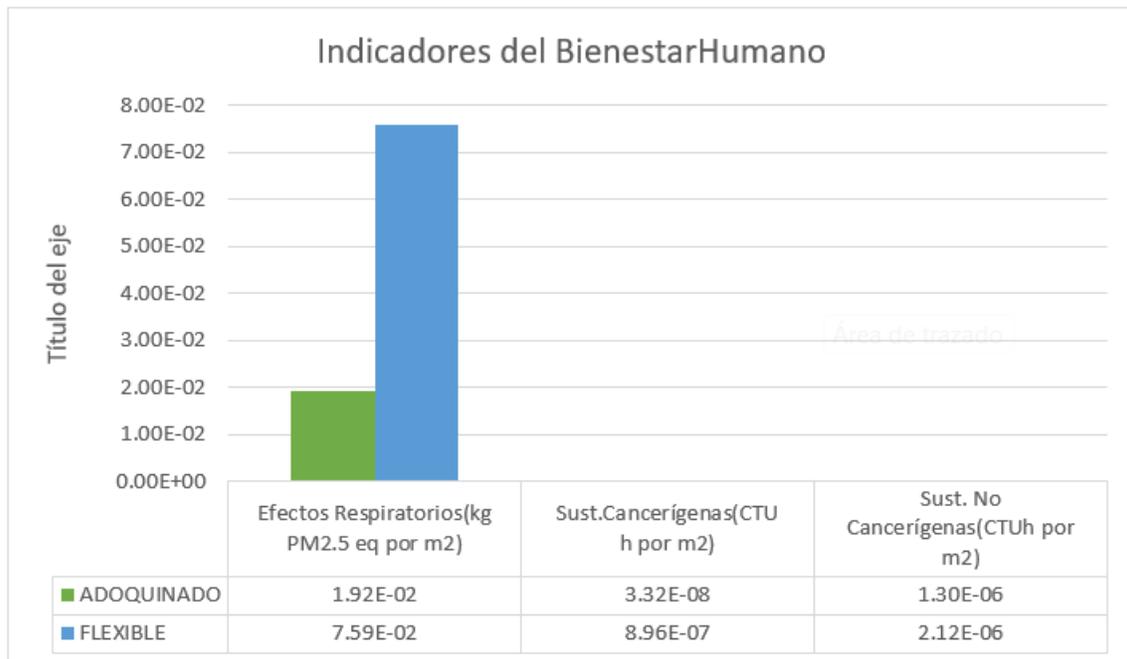


Figura 26. Indicadores del bienestar humano. Elaboración Propia.

Se advierte que los factores vinculados a sustancias con propiedades cancerígenas se sitúan en el orden de 4.6×10^{-7} Casos de Enfermedad por kilogramo Emitido (CTUh). Este valor implica que la pavimentación de 1,000 kilómetros de vía conlleva la eventualidad de que se manifiesten alrededor de 2.8 situaciones de cáncer a causa de las emisiones derivadas de dicho proceso. Por otra parte, el criterio relativo a sustancias no cancerígenas presenta una media de 1.7×10^{-6} CTUh, lo que sugiere que la pavimentación de 1000 kilómetros conlleva la probabilidad de que se presenten 10 tipos de enfermedades no cancerígenas.

La producción potencial de sustancias cancerígenas perteneciente a la vía flexible excede en 27 veces al potencial asociado al pavimento articulado. Paralelamente, se constata que el pavimento flexible exhibe un potencial de emisión de sustancias no cancerígenas 1.7 veces superior al observado en el pavimento articulado.

4.9.5.8. Resultados Globales

En el siguiente gráfico junto a su tabla observa la comparación global sobre los pavimentos investigados, donde se puede apreciar que el pavimento asfáltico tiene mayor carga ambiental a diferencia del pavimento adoquinado.

El Pavimento adoquinado de concreto presentó mayores impactos que el pavimento asfáltico respecto al agotamiento de ozono y el calentamiento global, considerando que la primera categoría tiene cantidades reducidas de emisiones. En la formación de smog tenemos, que en esta categoría, el pavimento asfáltico produce el doble de impacto que al producido por el pavimento adoquinado, entretanto en el criterio de salud humana se mantiene predominante el pavimento asfáltico.

La generación de bitumen implicó que la vía asfáltica presente un impacto significativamente superior al presentado por la vía adoquinada en la categorización de ecotoxicidad, acidificación y eutrofización. El empleo de maquinaria pesada y el traslado de agregados al lugar de la obra influye considerablemente en todas las categorías de impacto, que se relacionan con la quema de combustible diésel.

Categoría de Impacto	Pavimento 1 (Pav.Flexible)	Pavimento 2 (Pav.Adoquinado)
Calentamiento Global (kg C02 eq)	70.9	100.91
Smog (kg O3 eq)	14.09	6.69
Ecotoxicidad (CTUe)	27.18	1.34
Acidificación (kg S02 eq)	1.2	0.2
Eutrofización (kg N eq)	0.04	0.01
Efectos respiratorios (kg PM2,5 eq)	0.08	0.02
Sust. No Cancerígenas (CTUh)	2.12E-06	1.30E-06
Sust. Cancerígenas (CTUh)	8.96E-07	3.32E-08
Agotamiento Ozono (kg CFC-11 eq)	1.33E-08	2.39E-08

Tabla 11
Comparación para las Categorías TRACI 2.1 de Ambos Pavimentos

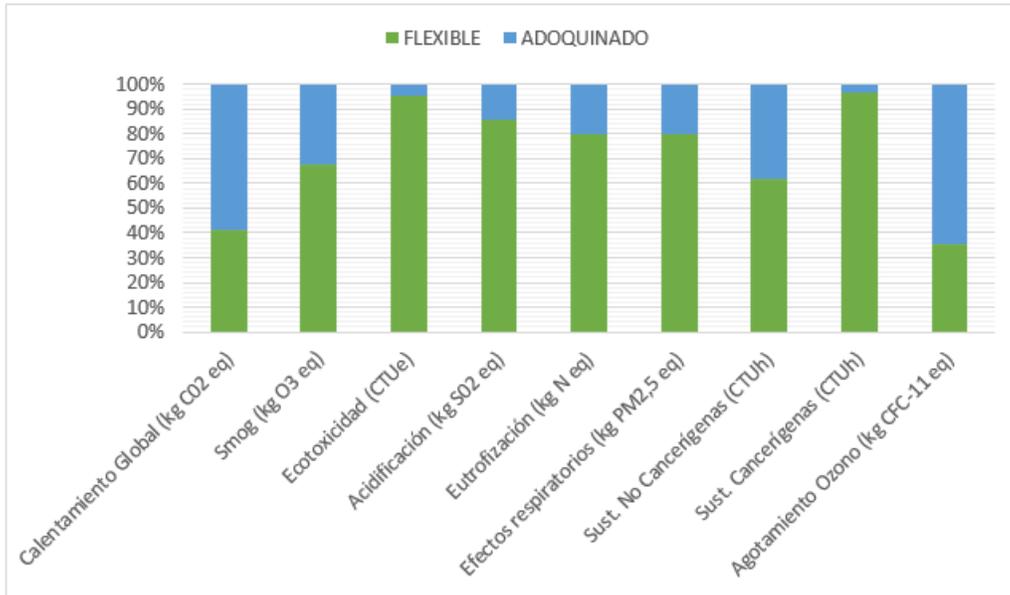


Figura 27. Comparación global para las categorías TRACI 2.1 entre los Pavimentos 1 y 2

La fase de construcción ejerce la mayor influencia en los resultados, siendo responsable aproximadamente de un 86% del impacto en siete de las nueve categorías evaluadas en la vía asfáltica, a diferencia del caso de la vía adoquinada, constituyó aproximadamente el 80% en seis de las nueve categorías.

V. DISCUSIÓN

Plescan et al, (2022). En su artículo de investigación, describieron al calentamiento global y cambio climático como el mayor problema ecológico que afecta directamente a la humanidad. En dicho estudio el enfoque empleado se basó en un análisis del ciclo de vida (ACV) de la cuna a la puerta. Los resultados obtenidos en su evaluación del ciclo de vida de un pavimento muestran diseños sostenibles para la construcción y restauración de pavimentos de carreteras, mientras que, en nuestra investigación los resultados arrojaron que, el impacto más significativo en ambas variantes de pavimento fue el calentamiento global. Compartiendo un resultado similar con la referencia mencionada.

Zhao y Yang. (2023), en su artículo lograron determinar que distintas metodologías como (RAP) Pavimento Asfáltico Reciclado, con un alto contenido, incrementará el consumo de las emisiones SFP y el consumo de energía. Como resultados obtuvieron, la utilización de metodologías eco ambientales descritas mejora e incrementan el ciclo de vida útil de un Pavimento Semiflexible (SFP). Así mismo en nuestra tesis tenemos relación con este resultado ya que la metodología TRACI 2.1 se desarrolló en el análisis del ciclo de vida de cualquier producto con el fin de proteger al ambiente, se muestra el alcance de los impactos potenciales de los pavimentos analizados.

Gruber et al. 2022, en su artículo titulado “Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de pavimento de asfalto reciclado”. Mediante este análisis afirmaron que el tráfico tiene un alto nivel de afectación en las emisiones de Gases de efecto invernadero, cuyo porcentaje es (95%). Esto es muy similar a nuestro resultado ya que la generación de bitumen y la aplicación de la capa asfáltica, actividades necesarias para la construcción de los pavimentos flexibles, requieren el empleo de combustibles derivados de fuentes fósiles, lo cual ocasiona la liberación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. La combustión de hidrocarburos, gasolina u otros combustibles como diésel, en el proceso de construcción, operación y el fin de vida de estos pavimentos.

Grace et al. (2023), en su artículo de investigación dedujeron que con una menor densidad disminuyeron los costos ambientales, debido a la reducción de las emisiones de CO₂ alcanzado un 16 %, sin embargo con la mitigación del impacto ambiental de SO₂ (dióxido de azufre), NO (óxido de nitrógeno), CO (monóxido de carbono) y material articulado (PM) 2,5 , PM 10y PM, por otro lado determinaron que el aumento de la densidad de LCC, produce un aumento en las GEI, demostrando el beneficio de emplear la densidad para la producción de emisiones. Aquí se obtiene una discrepancia con nuestros resultados ya que nosotros podemos acotar que, categorizando los factores relativos al bienestar humano, principalmente los que repercuten efectos respiratorios, cuantificados en kg de material particulado con un tamaño menor a 2.5 micrómetros, y que constituyen la problemática más acuciante debido a que la fase de construcción, las emisiones de SO₂ (dióxido de azufre), provenientes de las refinerías constituyen el 75% de los gases relacionadas con el pavimento flexible.

Liu et al. (2023), En su investigación nos dicen que la incertidumbre en forma de modelo tiene más influencia sobre los resultados de emisiones de carbono de un pavimento, con un aporte de emisiones de carbono entre 90% y 94%. En su investigación concluyó implementar una base integral, para la mejora de un Análisis de ciclo de vida de los pavimentos. Tiene similitud con nuestros resultados relacionado con el calentamiento global y las emisiones de carbono ya que la etapa de construcción de ambos pavimentos, fue la fase donde se generó mayor cantidad de emisiones, sin embargo, en el pavimento articulado esta etapa supera por 59.61 kg de CO₂ a la de un pavimento flexible, debido a la construcción y combustión durante el proceso de elaboración.

Gulotta et al. (2019), En su investigación sus resultados del análisis muestran que la etapa de la producción de materiales, incluida la extracción de materias primas y el suministro de recursos, es pertinente para casi todas las categorías de impacto evaluadas (contribución media superior al 50%). Esto se debe principalmente a la producción de betún, que es un producto a base de petróleo. En nuestra investigación se comprobó que la generación de bitumen implicó que la vía asfáltica presente un impacto significativamente superior al presentado por la vía adoquinada en la categorización de ecotoxicidad, acidificación y eutrofización. El empleo de maquinaria pesada y el traslado de agregados al lugar de la obra influye considerablemente en todas las categorías de impacto, que se relacionan con la quema de combustible diésel derivado también del petróleo lo que hace similar nuestros resultados.

Lü et al. (2019), En su investigación indicaron que, durante el uso de la carretera, la rugosidad del pavimento aumentará y tendrá un gran impacto en el consumo de combustible del vehículo y las emisiones de GEI de la carretera. El mantenimiento debe implementarse a tiempo. Este estudio presentó una evaluación básica de las características ambientales de diferentes materiales de un pavimento. Por nuestra parte para tenemos similarmente que la segunda etapa con mayor impacto ambiental es la de operación con un 23 % de impacto generado por las categorías de agotamiento de ozono, efectos respiratorios y sustancias no cancerígenas además el porcentaje de contaminación es de 25%, el cual es resultado del impacto de las categorías analizadas, siendo las sustancias no cancerígenas y agotamiento de ozono las más impactantes. Pudiendo relacionar nuestros resultados. Al identificar y abordar factores que contribuyen a un mayor desgaste o deterioro, el ACV puede ayudar a reducir los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo.

Heidari et al. (2020), de acuerdo a su investigación acerca de la selección de un pavimento sostenible de acuerdo al costo del ciclo de vida, obtuvo que de los dos tipos de pavimento la mejor alternativa de asfalto tiene menores costos de ciclo de vida, pero más emisiones de carbono y mucho más consumo de energía.

En acuerdo con su estudio se corroboró que a nivel de coste de ciclo de vida un pavimento flexible sería la opción a tomar, sin embargo, a nivel de emisiones se observó que duplicaba las emisiones de smog, aproximadamente 6 veces más capacidad de acidificación y 20 veces mayor potencial de ecotoxicidad en comparación con el pavimento articulado. Facilita la toma de decisiones informada al proporcionar datos cuantitativos sobre los impactos ambientales, lo que ayuda a los responsables de decisiones a considerar la sostenibilidad en la planificación de infraestructuras.

VI. CONCLUSIONES

En ambas variantes, la fase de construcción fue la principal fuente de impactos ambientales. En lo que respecta del pavimento asfáltico o flexible, esta fase representó, en promedio, el 86% de emisiones, mientras que para el pavimento adoquinado fue del 78%. De forma similar, solamente las categorías de agotamiento de ozono y sustancias no cancerígenas, estas con emisiones reducidas, presentan liberaciones más notables durante la fase de operación. Respecto al fin de vida, excluyendo posibles procesos de reciclaje o reutilización, este no llega a representar más del 3% del total de impactos ocasionados, a lo largo del ciclo de vida en estos tipos de pavimentación.

Con los resultados logrados, el impacto más significativo en ambas variantes de pavimento fue el calentamiento global. El pavimento de adoquines de concreto mostró un potencial de emisiones de CO₂ 1.4 veces mayor al pavimento asfáltico. La fase de operación fue determinante en estos resultados, destacando la necesidad de ampliar los estudios sobre la evolución del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en pavimentos urbanos, especialmente en el caso de pavimentos articulados, para llegar a conclusiones más precisas.

En contraste, el pavimento flexible mostró niveles de emisiones superiores a su equivalente en siete de las nueve categorías evaluadas. Se observó que duplicaba las emisiones de smog, aproximadamente 6 veces más capacidad de acidificación y 20 veces mayor potencial de ecotoxicidad en comparación con el pavimento articulado. Estos resultados se atribuyeron a las emisiones originadas durante la generación del bitumen, queroseno, así como en la fase de aplicación de la capa asfáltica.

Con respecto a la salud humana, estos pavimentos flexibles y articulados tienen un impacto similar. Sin embargo, los pavimentos flexibles tienen un impacto ambiental mayor en 4 categorías: eutrofización, acidificación, Sust. cancerígenas y ecotoxicidad. Esto se debe a que la generación de bitumen y la aplicación de la capa asfáltica, actividades necesarias para la construcción de los pavimentos flexibles, requieren el empleo de combustibles derivados de fuentes fósiles, lo cual ocasiona la liberación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. La combustión de hidrocarburos,

gasolina u otros combustibles como diésel, en el proceso de construcción, operación y el fin de vida de estos pavimentos, también tiene un impacto ambiental significativo.

VII. RECOMENDACIONES

Las vías urbanas en la región de Piura deben ser planificados considerando su rendimiento con el medio ambiente en cuanto a la capacidad para resistir el tráfico vehicular. Según los productos obtenidos en este estudio, el pavimento adoquinado se presentó como el pavimento más adecuado para vías con menor tránsito vehicular. No obstante, su eficacia fue afectada por dos aspectos: el incremento en el índice de rugosidad y el aumento en la cantidad de vehículos, lo que ocasiona emisiones significativas de Dióxido de Carbono y necesidad de un mantenimiento continuo.

Debido a que en la fase de construcción representa la etapa con mayor actividad e impacto, involucrando todas las categorías de impacto con la utilización de combustibles fósiles. Se recomienda implementar un procedimiento para reducir el uso de estos combustibles durante el proceso de construcción. Esto implica tener en cuenta medidas a largo y corto plazo, así como evaluar las longitudes de traslado, aumentar la eficiencia e invertir en los equipos más eficientes como en el caso de la maquinaria pesada. Estas medidas no solo reducirán las emisiones, sino que también resultarán en ahorros monetarios significativos en combustible.

La normativa peruana CE 0.10 referente a pavimentos urbanos no proporciona alguna estrategia específica para investigar la rehabilitación de los pavimentos en las zonas urbanas, dejando esta decisión en manos de los funcionarios municipales. En consecuencia, es necesario llevar a cabo investigaciones orientadas a establecer un sistema eficaz de gestión de infraestructuras viales, con pautas para la investigación y eventual rehabilitación de los pavimentos. Esto permitirá la obtención de información sobre el estado en el que se encuentren las vías, sus periodos de mantenimiento, como también sus impactos ambientales relacionados a estos trabajos, mejorando así los medidores de servicio de los pavimentos. Un método comúnmente empleado para encontrar la idoneidad del estado en el que se encuentran los pavimentos, es el Índice de Rugosidad Internacional, donde se encuentran distintas aplicaciones para la medición las cuales se relación con la situación local. Gracias a las conclusiones logradas sabemos que estas estrategias significan un punto de inicio relevante.

Finalmente, al considerar que la producción del asfalto y el cemento contribuye de manera significativa a los impactos ambientales, es crucial que los fabricantes de materiales de construcción con alto requerimiento de energía, suministren datos precisos y claros sobre emisiones y recursos asociados con sus procesos. Actualmente, no hay disponibilidad de información directa de los fabricantes en el país, lo que podría resultar en estimaciones que no reflejen completamente la situación real. Igualmente, los contratistas y grandes empresas del rubro de construcción deben generar informes detallados sobre los recursos utilizados en sus proyectos, considerando cantidades de agua, uso de combustibles y energía eléctrica, con el fin de crear catálogos de información o datos y ejemplos que transmitan de manera concisa las condiciones en la región de Piura. Esto permitirá abordar y reducir de manera positiva los impactos con el medio ambiente relacionados con la ejecución de pavimentos urbanos.

REFERENCIAS

- LÜ, G., WANG, Y., LI, H., WANG, D. y OESER, M., 2019. *The Environmental Impact Evaluation on the application of permeable Pavement based on life cycle analysis. International Journal of Transportation Science and Technology [in line]*, vol. 8, no. 4, DOI 10.1016/j.ijtst.2019.05.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.006>.
- PLEȘCAN, C., BARTA, M., MAXINEASA, S.G. y PLEȘCAN, E.-L., 2022. *Life cycle assessment of concrete pavement rehabilitation: a Romanian case study. Applied sciences [en línea]*, vol. 12, no. 4, DOI 10.3390/app12041769. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app12041769>.
- OYEYI, A.G., ACHEBE, J., NI, F.M.-W. y TIGHE, S., 2023. *Life cycle assessment of lightweight cellular concrete subbase pavements in Canada. International Journal of Pavement Engineering [en línea]*, vol. 24, no. 1, DOI 10.1080/10298436.2023.2168662. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2168662>.
- LIU, Y., LI, H., WANG, H., WANG, Y. y HAN, S., 2023. *Integrated Life Cycle analysis of cost and CO2 emissions from vehicles and construction work activities in highway pavement service life. Atmosphere [en línea]*, vol. 14, no. 2, DOI 10.3390/atmos14020194. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos14020194>.
- PICARDO, A., GALVÁN, M.J., SOLTERO, V.M. y PERALTA, M.E., 2023. *A comparative life cycle assessment and costing of lighting systems for environmental design and construction of sustainable roads. Buildings [en línea]*, vol. 13, no. 4, DOI 10.3390/buildings13040983. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/buildings13040983>.
- MARTINEZ-SOTO, A., CALABI-FLOODY, A., VALDÉS-VIDAL, G., HUCKE, A. y MARTÍNEZ-TOLEDO, C., 2023. *Life cycle assessment of natural Zeolite-Based warm mix asphalt and reclaimed asphalt pavement. Sustainability [en línea]*, vol. 15, no. 2, DOI 10.3390/su15021003. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15021003>.
- AMAHMOUD, A., ATTAR, M.M.E. y MELEISHY, A., 2022. *The Evolution of Life Cycle Assessment Approach: A review of past and future prospects. IOP conference series [en línea]*, vol. 992, no. 1, DOI 10.1088/1755-1315/992/1/012002. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012002>.
- CAO, R., LENG, Z., YU, H. y HSU, S.-C., 2019. *Comparative Life cycle Assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. Resources, Conservation and Recycling [en línea]*, vol. 147, DOI 10.1016/j.resconrec.2019.04.031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.031>.

- GULOTTA, T.M., MISTRETTO, M. y PRATICÒ, F.G., 2019. *A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads*. *Science of The Total Environment* [en línea], vol. 673, DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.04.046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.046>.
- LI, J., XIAO, F., ZHANG, L. y AMIRKHANDANIAN, S., 2019. *Life cycle Assessment and Life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: a review*. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 233, DOI 10.1016/j.jclepro.2019.06.061. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.
- LIU, J., LI, H. y WANG, Y., 2020. *Integrated Life Cycle Assessment of permeable pavement: model development and case study*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [en línea], vol. 85, DOI 10.1016/j.trd.2020.102381. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102381>.
- LÜ, G., WANG, Y., LI, H., WANG, D. y OESER, M., 2019b. *The Environmental Impact Evaluation on the application of permeable Pavement based on life cycle analysis*. *International Journal of Transportation Science and Technology* [en línea], vol. 8, no. 4, DOI 10.1016/j.ijst.2019.05.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2019.05.006>.
- COTTE, E.H.S., FLÓRES, N.V., DEL ROCÍO OCHOA AVEROS, S. y MADERO, Y.N.S., 2023. Un análisis multicriterio para la toma de decisiones en la selección de una mezcla asfáltica en pavimentos. *Tecnura* [en línea], vol. 27, no. 75, DOI 10.14483/22487638.18929. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/22487638.18929>.
- FLORES, O.J.A., VÁSQUEZ, J.J.A., SÁNCHEZ, C.F., LAFITTE, E.D.R. y PÉREZ, S.P.M., 2022. Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: una revisión literaria. *Infraestructura vial* [en línea], vol. 24, no. 43, DOI 10.15517/iv.v24i43.47931. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.47931>.
- ANDRADE, A., CASTILLO, G. y CHACATER, C., 2021. Efectos de la variabilidad de los datos iniciales en el índice de condición del pavimento y predicción de su deterioro. *NOVASINERGIA* [en línea], vol. 4, no. 1, DOI 10.37135/ns.01.07.06. Disponible en: <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.06>.
- BALAGUERA, A., ALBERTÍ, J., CARVAJAL, G. y FULLANA-I-PALMER, P., 2021. *Stabilising rural roads with waste streams in Colombia as an environmental strategy based on a life cycle assessment methodology*. *Sustainability* [en línea], vol. 13, no. 5, DOI 10.3390/su13052458. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13052458>.

- SANTOS, A.G.D. y FERRARI, A.K., 2019b. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. *Ambiente Construído* [en línea], vol. 19, no. 3, DOI 10.1590/s1678-86212019000300323. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300323>.
- ROJAS, R.A.G., 2020. *Behavior analysis of maximum stresses induced in rigid pavements due to partial replacement of slabs*. *Iteckne* [en línea], DOI 10.15332/iteckne.v17i2.2470. Disponible en: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v17i2.2470>.
- RONALD, G.C.P., [sin fecha]. Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible. [en línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2071-081X2020000200008&script=sci_arttext.
- LIU, Y., LI, H., WANG, H., WANG, Y. y HAN, S., 2023b. *Integrated Life Cycle analysis of cost and CO2 emissions from vehicles and construction work activities in highway pavement service life*. *Atmosphere* [en línea], vol. 14, no. 2, DOI 10.3390/atmos14020194. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos14020194>.
- VÍCTOR, Y.P., 2023. Análisis del ciclo de vida y optimización. aplicación al puente de la bahía de Zhanjiang en China. [en línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/192928>.
- LIU, Qi, CAI, M., YU, B., QIN, S., QIN, X. y ZHANG, J., 2023. *Life cycle assessment of greenhouse gas emissions with uncertainty analysis: A case study of asphaltic pavement in China*. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 411, DOI 10.1016/j.jclepro.2023.137263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137263>.
- ZHAO, W. y YANG, Q., 2023. *Life cycle assessment and multi-index performance evaluation of semi-flexible pavement after composite modification by using fly ash, rubber particles, warm mixing asphalt and recycled asphalt pavement*. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 364, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129945. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129945>.
- ARYAN, Y., DIKSHIT, A.K. y SHINDE, A.M., 2023. *A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures*. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 336, DOI 10.1016/j.jenvman.2023.117697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117697>.
- ALIMOHAMMADI, H., SCHAEFER, V.R., ZHENG, J. y ZHENG, G., 2021b. *A state-of-the-art large-scale laboratory approach to evaluating the effectiveness of geogrid...* *ResearchGate* [en línea], Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/351512596>.

- BHANDARI, S., LUO, X. y WANG, F., 2023. *Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. International Journal of Transportation Science and Technology* [en línea], vol. 12, no. 1, DOI 10.1016/j.ijtst.2022.02.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.004>.
- BASTIDAS-MARTÍNEZ, J.G., REYES, F. y QUINTANA, H.A.R., 2022. *Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: a review. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* [en línea], vol. 9, no. 5, DOI 10.1016/j.jtte.2022.08.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.08.001>.
- DA SILVA, W.B.C., PICADO-SANTOS, L., DE ARAÚJO BARROSO, S.H., CABRAL, A.E.B. y STEFANUTTI, R., 2023. *Assessment of interlocking concrete block pavement with By-Products and comparison with an asphalt pavement: a review. Applied sciences* [en línea], vol. 13, no. 10, DOI 10.3390/app13105846. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app13105846>.
- MERTEN, F.R.M., DUTRA, V.F.P., STRIEDER, H.L. y GRAEFF, Â.G., 2022. *Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials* [en línea], vol. 342, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127939. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127939>.
- NAM, B.H., 2022. *In-Situ super Accelerated pavement test for the fatigue evaluation of in-service airfield rigid pavement – a case study at Mechem Airport. Construction and Building Materials* [en línea], vol. 353, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129115. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129115>.
- PHAM, V.N., 2023. *REVIEW OF WATER AND HEAT BALANCES AND CHALLENGES TO ADOPTION OF PERMEABLE PAVEMENT SYSTEM IN VIETNAM.* [en línea]. Disponible en: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3824>.
- RANDO, P.O., 2023. Análisis comparativo de la capacidad estructural de pavimentos flexibles con tratamientos superficiales con PEN 60/70 y emulsión catiónica tipo CSS-1HP. [en línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12848/5972>.
- LIU, Y., ZHU, X., WANG, X., WANG, Y., YU, Q. y HAN, S., 2022. *The influence of work zone management on user carbon dioxide emissions in life cycle assessment on highway pavement maintenance. Advances in Meteorology* [en línea], vol. 2022, DOI 10.1155/2022/1993564. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2022/1993564>.

- HEIDARI, M.R., HERAVI, G. y ESMAEELI, A., 2020. *Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: a probabilistic model using managerial flexibilities*. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 254, DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046>.
- HAUSCHILD, M.Z., ROSENBAUM, R.K. y OLSEN, S.I., 2018. *Life cycle assessment* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.
- MASSENLLI, G.S.R. y DE PAIVA, C.E.L., 2019. *Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* [en línea], DOI 10.4067/s0718-33052019000400613. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000400613>.
- XIN, J., AKIYAMA, M. y FRANGOPOL, D.M., 2023. *Sustainability-informed management Optimization of asphalt pavement considering risk evaluated by multiple performance indicators using deep neural networks*. *Reliability Engineering & System Safety* [en línea], vol. 238, DOI 10.1016/j.ress.2023.109448. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109448>.
- DE BORTOLI, A. y AGEZ, M., 2023. *Environmentally-extended input-output analyses efficiently sketch large-scale environmental transition plans: Illustration by Canada's Road Industry*. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 388, DOI 10.1016/j.jclepro.2023.136039. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136039>.
- MOHAMED, A., WANG, W., WENG, H., FANG, Y. y XIAO, F., 2022. *Potential of project level construction and rehabilitation plans to attenuate the economic and environmental burdens of flexible road pavements: a review study*. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 354, DOI 10.1016/j.jclepro.2022.131713. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131713>.
- PIAO, Z., HEUTSCHI, K., PIEREN, R., MIKHAILENKO, P., POULIKAKOS, L.D. y HELLWEG, S., 2022b. *Environmental trade-offs for using low-noise pavements: Life cycle assessment with noise considerations*. *Science of The Total Environment* [en línea], vol. 842, DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.156846. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156846>.
- MOHAMED, A., XIAO, F. y HETTIARACHCHI, C., 2022. *Project level management decisions in construction and rehabilitation of flexible pavements*. *Automation in Construction* [en línea], vol. 133, DOI 10.1016/j.autcon.2021.104035. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104035>.

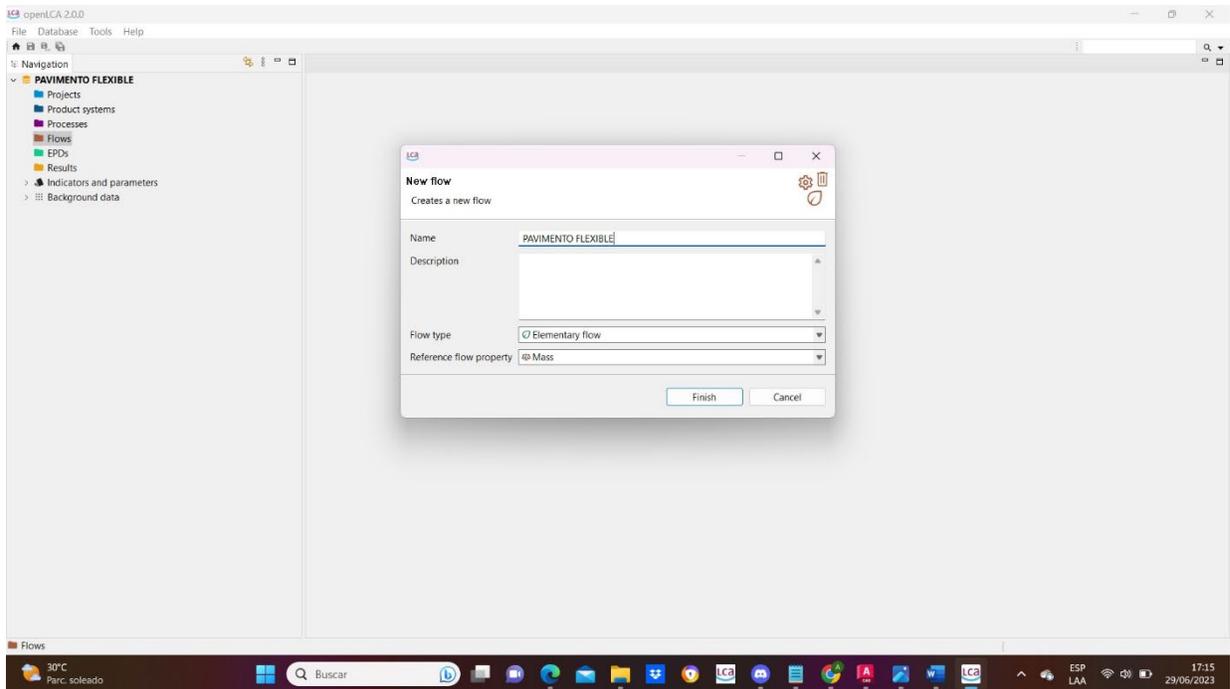
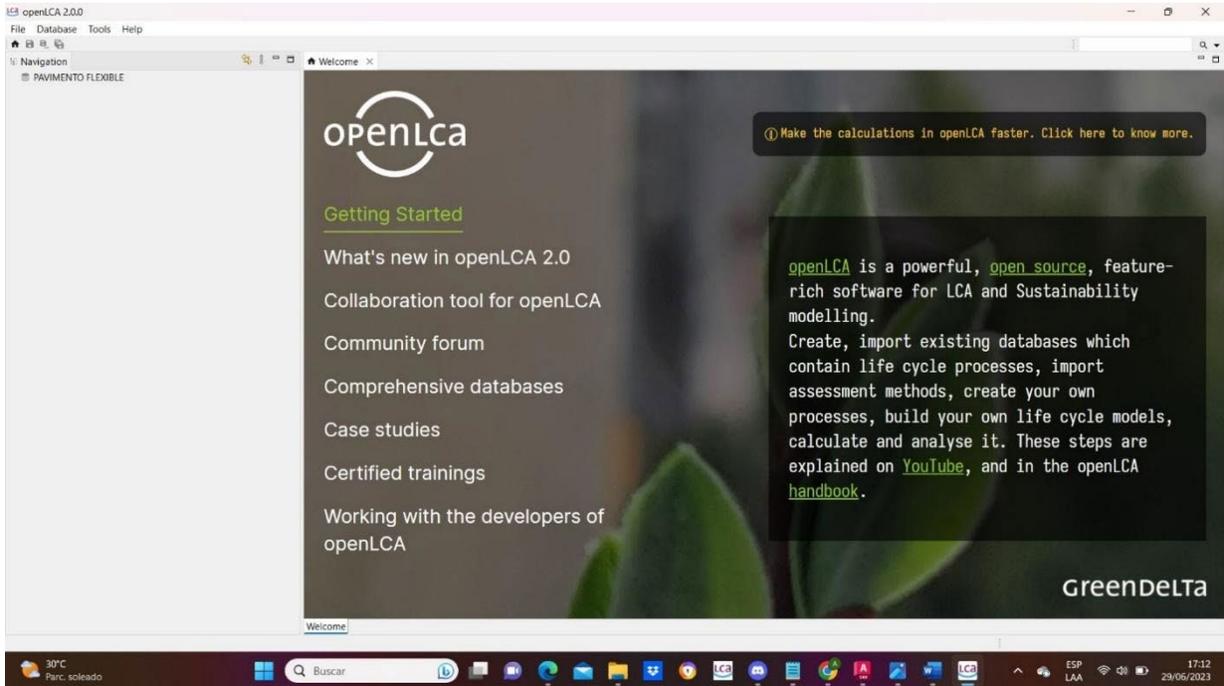
RAFIQ, W., MUSARAT, M.A., ALTAF, M., NAPIAH, M., SUTANTO, M.H., ALALOUL, W.S., JAVED, M.F. y MOSAVI, A., 2021. *Life cycle cost analysis Comparison of hot mix asphalt and reclaimed asphalt pavement: a case study*. *Sustainability* [en línea], vol. 13, no. 8, DOI 10.3390/su13084411. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13084411>.

ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Análisis del ciclo de vida	El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología regida por los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO), con las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006	Se usará el software OpenLCA, que medirá la cantidad de emisiones generadas en el proceso constructivo de un pavimento.	Aspecto Ambiental	Calidad del proceso constructivo.	Nominal
				Evaluación del impacto Ambiental.	Nominal
Pavimentos	Capa lisa, dura y resistente de asfalto, cemento, madera, adoquines u otros materiales con que se recubre el suelo para que esté firme y llano.	Se evaluará el pavimento en cada etapa de su proceso constructivo, desde la primera actividad como lo es la extracción de los recursos naturales, hasta el cumplimiento de su vida estructural útil.	Aspecto Estructural	Estado estructural	Nominal
				Comportamiento estructural.	Nominal

ANEXO 02: Instrumento de Recolección de Datos.



ANEXO 03: PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Área: 4864.08 m²

Plazo de ejecución: 3 meses (90 días calendario)

Ubicación: Distrito de Castilla – Provincia de Piura.

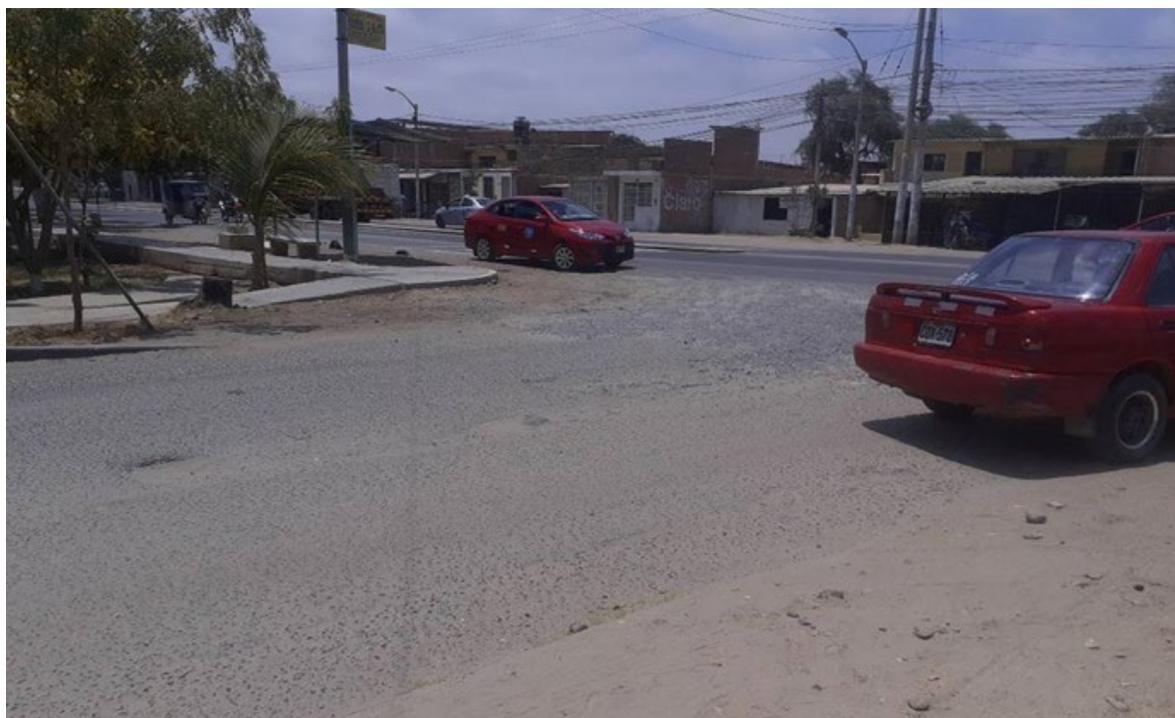


Figura: Inicio de Pavimento Flexible analizado.



Figura: Estado antes de la Demolición



Figura: Estado antes de la Demolición



Figura: Medida de ancho de la Vía.

ETAPA I: CONSTRUCCIÓN

FLUJO DE REFERENCIA: DEMOLICIÓN



Figura: Demolición de la carpeta asfáltica presente.



Figura: Eliminación de material excedente.

FLUJO II: BASE GRANULAR



Figura: Inicio de colocación de base granular.



Figura: Fin de colocación de base granular.



Figura: Rectificación de base granular.



Figura: Compactación de base granular.



Figura: Inicio de imprimación asfáltica.



Figura: Imprimación asfáltica.



Figura: Compactación de carpeta asfáltica.



Figura: Fin de imprimación asfáltica.

ANEXO 04: PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN PAVIMENTO ARTICULADO

Área: 19115.92 m²

Plazo de ejecución: 7 meses (210 días calendario)

Ubicación: AA. HH San Martín III etapa Distrito de 26 de octubre – Provincia de Piura.

ETAPA I: CONSTRUCCIÓN

FLUJO DE REFERENCIA: DEMOLICIÓN



Figura: Demolición de la carpeta existente.

FLUJO II: BASE GRANULAR



Figura: Nivelación de Base Granular.



Figura: Colocación de Base Granular.



Figura: Compactación de Base Granular.



Figura: Compactación de base granular con apisonador.

FLUJO III: CARPETA ADOQUINADA



Figura: Colocación de adoquín.



Figura: Vibración de carpeta adoquinada.



Figura: Sección de carpeta adoquinada.



Figura: Carpeta adoquinada.

ANEXO 05: PANEL FOTOGRÁFICO

VISITA AL CAMPAMENTO



Figura: Agregado utilizado en la base granular de pavimento flexible.



Figura: Identificación del tipo de agregado.



Figura: Verificación de agregado.



Figura: Agregado utilizado en base granular de un pavimento adoquinado.



Figura: Medición de carpeta asfáltica terminada.



Figura: Toma de medidas.



Figura: Carpeta adoquinada terminada.



Figura: Verificación de datos tomados.

ANEXO 06 : CONSIDERACION DE APORTES PARA PAVIMENTO 1 Y PAVIMENTO 2

Item	Proceso	Flujon de referencia	Imput	Cantidad (por m2)	Unidad
1	Demolicion de carpeta asfalto	Via sin pavimentar	Ocupación del espacio	0.0829	m2*año
			Residuos	0.125	tn
			Eliminación de residuos	0.761	tr/km
			Cargador 160 - 195 HP	0.098	hm
2	Colocación de base	Base granular	Camión cisterna inc. 2500gl	0.0618	hm
			Mini cargador, 800 kg	0.0019	hm
			Motoniveladora 130 HP	0.061	hm
			Rodillo vibrador 130 hp	0.119	hm
			Camión volquete 15m3	0.01	hm
			Cargador 160 - 195 HP	0.121	hm
			Recursos de cantera (arena)	0.549	m3
			Piedra chancada	0.649	m3
			Material para base	17.5	tn
			Desplazamiento de material desde la cantera	17.5	tr/km
			Agua	0.054	m3
3	Colocación de carpeta asfaltica	Carpeta asfaltica	Azfaltadora	0.0269	hm
			Rodillo autop. 110 HP	0.0349	hm
			Rodrillo vibrador	0.0319	hm
			Cargador de 100 hp	0.0319	hm
			compresora de 87 HP	0.0029	hm
			Volquete 15 m3	0.01	hm
			Distribuidora de asfalto 800	0.0029	hm
			Piedra 3/4 para asfalto	0.069	m3
			Arena gruesa	0.049	m3
			Material para base	0.21	tn
			Relleno	0.029	tn
			Transporte de material	1.415	tr/km
			Mezcla de asfalto	1.019	gal
Kerocene	0.079	tn			

Item	Proceso	Flujon de referencia	Imput	Cantidad (por m2)	Unidad
1	Demolicion de carpeta articulada	Via sin pavimentar m2	Ocupación del espacio	0.0829	m2*año
			Residuos	0.059	tn
			Eliminación de residuos	0.359	tr/km
			Cargador 160 - 195 HP	0.0149	hm
2	Colocación de base	Base granular m2	Camión cisterna inc. 2500gl	0.061	hm
			Mini cargador, 800 kg	0.0019	hm
			Motoniveladora 130 HP	0.0619	hm
			Rodillo vibrador 130 hp	0.021	hm
			Camión volquete 15m3	0.014	hm
			Cargador 160 - 195 HP	0.122	hm
			Transporte de material	23.039	tr/km
			Material para base	23.039	tn
			Arena	0.549	m3
			Piedra chancada	0.649	m3
			Agua	0.054	m3
			3	Colocación de carpeta adoquinada	Adoquinado m2
Piedra chancada	0	m3			
Hormigon	0.013	m3			
Remosion de material	0.145	tn			
Transporte de material	1.754	tr/km			
Alambre n°8	0.0019	kg			
Petroleo	0	gl			
Agua	0.0019	m3			
Adoquines 50m2	0.174	tn			
cemento portland T1	0.001	tn			
Concreto prefabricado pa)ra sardinel	0.021	tn			
Transporte de materiales	1.675	tr/km			
Cargador 160 - 195 HP	0.01	hm			
montacargas	0.079	hm			
cortadora de concreto	0.041	hm			
plancha compactadora	0.039	hm			
Mezcladora de concreto	0.01	hm			
Vibrador HP	0.0001	hm			
Volquete	0.0001	hm			



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SAGASTEGUI PLASENCIA FIDEL GERMAN, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - PIURA, asesor de Tesis titulada: "Cuantificación del impacto ambiental de los pavimentos urbanos mediante el método Análisis del ciclo de vida (ACV) en la región de Piura - Piura - Perú", cuyos autores son CHAU CHAVEZ FLAVIO ALEXANDER, NAVARRO MENDOZA ANGEL JAIR, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 16.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

PIURA, 30 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SAGASTEGUI PLASENCIA FIDEL GERMAN DNI: 18173778 ORCID: 0000-0003-0836-0062	Firmado electrónicamente por: FSAGASTEGUIP el 30-12-2023 07:39:42

Código documento Trilce: TRI - 0712934