

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL ADOQUÍN PARA
PAVIMENTO PEATONAL RECICLADO VERSUS EL CONVENCIONAL”**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

NEWTON GUILLERMO TOCTO GUERRA

ASESOR:

RAMZY FRANCIS KAHHAT ABEDRABBO, Ph.D

Lima, Septiembre del 2020

RESUMEN

Actualmente, el sector construcción es uno de los principales impulsores del crecimiento económico en el Perú, pero también es fuente de contaminación debido principalmente a la extracción informal de las canteras de río y la deficiente gestión de residuos de construcción y demolición; por lo que surge la necesidad de encontrar alternativas de provisión de materias primas que sean amigables al medio ambiente y permitan disminuir la producción de materiales convencionales que utilizan recursos no renovables.

Por ello, tomando en cuenta la falta de estudios que contrastan los impactos ambientales entre materiales de construcción convencionales y productos innovadores que aprovechan el reciclaje de residuos, se realiza la presente investigación con el objetivo de comparar los impactos ambientales entre el adoquín reciclado y el adoquín convencional peatonal, utilizando el método de Análisis de Ciclo de Vida establecidas en las normas ISO 14040 e ISO 14044; en el que se realizó la evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida en base a 3 categorías de impacto ambiental seleccionadas y considerando como unidad funcional 1 m² de superficie pavimentada.

Los resultados determinaron que al realizar la comparación entre la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional y con adoquín reciclado, para las categorías de potencial de calentamiento global, consumo de energía primaria y agotamiento de mineral, la pavimentación con adoquín convencional representa una contaminación de aproximadamente 56%, 53% y 46% más, respectivamente, que la pavimentación con adoquín reciclado. Con lo que se demuestra que el adoquín reciclado es el producto que genera un menor impacto ambiental, debido a que aprovecha los residuos reciclados de construcción y demolición, para su elaboración.

Es así, que la presente investigación tiende a incentivar la práctica de una construcción con criterios de una economía circular, el cual permita el logro de una construcción sostenible y calidad de vida.

Palabras claves: Análisis de ciclo de vida, adoquín reciclado, adoquín convencional, evaluación del impacto del ciclo de vida y economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a Dios por las bendiciones que me ha brindado y asimismo a mis padres, quienes siempre han estado conmigo durante mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. De igual manera agradezco a Flory, Christian y Stefanny por el soporte brindado en la presente tesis. Además, agradezco a mi asesor Ramzy Kahhat, quien gracias a sus consejos y confianza brindada he podido culminar este trabajo.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Lista de figuras | v |
| Lista de tablas | vii |
| Abreviaturas | ix |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 6 |
| 2.1 ORIGEN DEL ACV EN EL MUNDO COMO MÉTODO PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL | 6 |
| 2.2 APLICACIÓN DEL ACV EN EL SECTOR CONSTRUCCIÓN..... | 11 |
| 2.2.1 Aplicación del ACV en los materiales de construcción..... | 15 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA | 20 |
| 3.1 HIPÓTESIS..... | 20 |
| 3.2 OBJETIVOS..... | 20 |
| 3.3 MATERIALES Y METODOS..... | 21 |
| 3.3.1 La herramienta de ACV según la norma ISO..... | 21 |
| 3.3.2 Software para el desarrollo de ACV..... | 33 |
| CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO | 36 |
| 4.1 ALCANCES DEL PROYECTO..... | 36 |
| 4.1.1 Límites de los sistemas en estudio | 36 |
| 4.1.2 Definición de la unidad funcional..... | 40 |
| 4.2 RECOLECCIÓN DE DATOS PARA EL ICV..... | 41 |
| 4.3 PROCESOS UNITARIOS DEL ICV DEL PROYECTO..... | 56 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 72 |
| 5.1 EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA (EICV).72 | |
| 5.1.1 Potencial de calentamiento global..... | 74 |
| 5.1.2 Consumo de Energía..... | 82 |
| 5.1.3 Agotamiento del mineral..... | 89 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES..... | 97 |
| Lista de referencias..... | 100 |

ANEXOS

ANEXO A Preparación para la recolección de datos para el adoquín CICLO antes de la visita al campo.

ANEXO B Preparación para la recolección de datos para el adoquín Convencional antes de la visita al campo.

ANEXO C Panel Fotográfico.



Lista de figuras

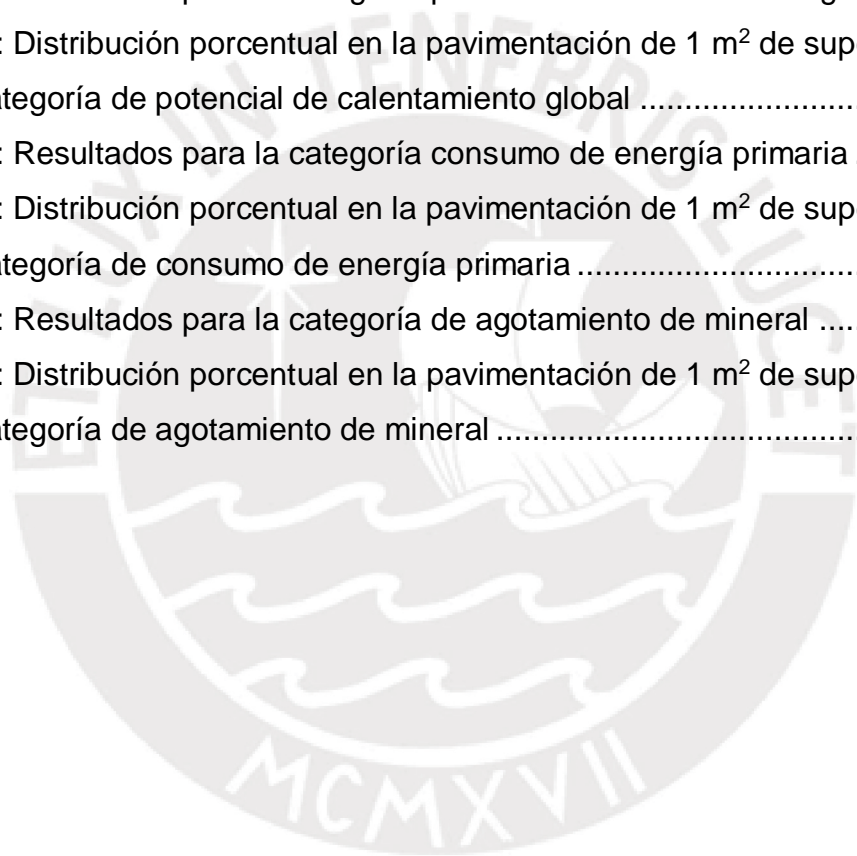
| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Extracción de hormigón (Millones de toneladas métricas) entre los años 2011-2015..... | 2 |
| Figura 1.2: Porcentaje de residuos por sectores declarados en el 2014..... | 3 |
| Figura 2.1: Comparación de impactos ambientales entre agregados naturales y agregados del reciclaje de C&D..... | 16 |
| Figura 2.2: Sistema de los agregados reciclados..... | 17 |
| Figura 3.1: Fases del ACV | 22 |
| Figura 3.2: Sistema de un producto | 24 |
| Figura 3.3: Tipos de estudios de ACV determinados por el alcance | 25 |
| Figura 3.4: Metodología para el desarrollo del ICV | 26 |
| Figura 3.5: Esquema de entradas y salidas para un Proceso Unitario | 26 |
| Figura 3.6: Elementos de la fase EICV..... | 28 |
| Figura 3.7: Categorías de punto medio y final de ReCipe2016 v1.03 | 31 |
| Figura 3.8: Procedimiento para el uso del software Simapro 8.05 | 35 |
| Figura 4.1: Procesos involucrados en el adoquín reciclado | 38 |
| Figura 4.2: Procesos involucrados en el adoquín convencional..... | 39 |
| Figura 4.3: Sistema del adoquín convencional..... | 39 |
| Figura 4.4: Sistema del adoquín reciclado | 40 |
| Figura 4.5: Unidad funcional del sistema..... | 41 |
| Figura 4.6: Secuencia de recolección de datos..... | 43 |
| Figura 4.7: Tolva con cinta transportadora | 48 |
| Figura 4.8: Chancadora primaria..... | 49 |
| Figura 4.9: Zaranda vibratoria clasificadora de 500 x 1200..... | 50 |
| Figura 4.10: Mezcladora de Concreto | 51 |
| Figura 4.11: Bloquetera tipo rosa cometa..... | 52 |
| Figura 4.12: Vibro compactadora tipo rana | 53 |
| Figura 4.13: Placa Compactadora 120T..... | 54 |
| Figura 4.14: Cortadora manual para adoquines | 55 |
| Figura. 4.15: Distancia aproximada desde la ciudad de Huánuco a la cantera de Chullqui | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.1: Procesos vinculados a la unidad funcional y a las unidades de referencia de los adoquines en comparación | 74 |
| Figura 5.2: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global en la obtención de 1 tonelada de agregados..... | 76 |
| Figura 5.3: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global por la obtención de 1 unidad de adoquín..... | 77 |
| Figura 5.4: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global en la pavimentación de 1 m ² de superficie con adoquín | 79 |
| Figura 5.5: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de potencial de calentamiento global | 81 |
| Figura 5.6: Método Cumulative Energy Demand (CED) - Resultados para la categoría consumo de energía primaria en la obtención de 1 tonelada de agregados | 84 |
| Figura 5.7: Método Cumulative Energy Demand (CED). Resultados para la categoría de consumo de energía primaria en la obtención de 1 unidad de adoquín | 85 |
| Figura 5.8: Método Cumulative Energy Demand (CED) - Resultados para la categoría de consumo de energía primaria en la pavimentación de 1 m ² de superficie con adoquín | 86 |
| Figura 5.9: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de consumo de energía primaria..... | 88 |
| Figura 5.10: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento del mineral en la obtención de 1 tonelada de agregados | 91 |
| Figura 5.11: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento del mineral en la obtención de 1 unidad de adoquín | 92 |
| Figura 5.12: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento de mineral en la pavimentación de 1 m ² de superficie | 93 |
| Figura 5.13: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de agotamiento de mineral..... | 95 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1: Requerimientos para definir el alcance del ACV | 23 |
| Tabla 3.2: Metodologías, categorías e indicadores de impacto ambiental correspondientes a la investigación | 29 |
| Tabla 4.1: Información de la cantera del río Huallaga ubicado en la localidad de Chullqui- Huánuco | 44 |
| Tabla 4.2: Diseño de mezcla para el adoquín convencional y reciclado | 45 |
| Tabla 4.3: Detalles técnicos de la retroexcavadora | 46 |
| Tabla 4.4: Detalles técnicos de la tolva con cinta transportadora | 48 |
| Tabla 4.5: Detalles técnicos de la chancadora primaria | 49 |
| Tabla 4.6: Detalles técnicos de la zaranda vibratoria | 50 |
| Tabla 4.7: Detalles Técnicos de Mezcladora tipo trompo | 51 |
| Tabla 4.8: Detalles Técnicos de la bloquetera tipo rosa cometa | 52 |
| Tabla 4.9: Detalles Técnicos Vibro compactadora | 53 |
| Tabla 4.10: Detalles Técnicos Placa Compactadora 120T | 54 |
| Tabla 4.11: Procesos Unitarios con sus respectivos productos finales pertenecientes al ACV de los adoquines de la investigación | 57 |
| Tabla 4.12: Proceso unitario de obtención de materiales para el adoquín convencional y reciclado | 59 |
| Tabla 4.13: Proceso unitario de clasificación de materiales para el adoquín reciclado | 60 |
| Tabla 4.14: Proceso unitario de trituración del material para el adoquín convencional y reciclado | 61 |
| Tabla 4.15: Proceso unitario de tamizado del material para el adoquín convencional y reciclado | 62 |
| Tabla 4.16: Proceso unitario de dosificación del material para el adoquín convencional y reciclado | 64 |
| Tabla 4.17: Proceso unitario de amasado del material para el adoquín convencional y reciclado | 65 |
| Tabla 4.18: Proceso unitario de vibrado y moldeado del material para el adoquín convencional y reciclado | 66 |

| | |
|---|----|
| Tabla 4.19: Proceso unitario de curado del material para el adoquín convencional y reciclado | 67 |
| Tabla 4.20: Materiales necesarios para la instalación de 1m ² de superficie pavimentada con adoquines..... | 68 |
| Tabla 4.21: Proceso unitario de instalación del material para el adoquín convencional y reciclado | 69 |
| Tabla 4.22: Detalles para el proceso unitario de transporte (incluido en el proceso de instalación)..... | 71 |
| Tabla 5.1: Cantidad de cemento en los tipos de adoquines a comparar | 73 |
| Tabla 5.2: Resultados para la categoría potencial de calentamiento global | 75 |
| Tabla 5.3: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de potencial de calentamiento global | 81 |
| Tabla 5.4: Resultados para la categoría consumo de energía primaria | 83 |
| Tabla 5.5: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de consumo de energía primaria | 88 |
| Tabla 5.6: Resultados para la categoría de agotamiento de mineral | 90 |
| Tabla 5.7: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m ² de superficie para la categoría de agotamiento de mineral | 95 |



ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| ACV | Análisis de Ciclo de Vida |
| ICV | Inventario de Ciclo de Vida |
| C&D | Construcción y Demolición |
| CILCA | Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida |
| EICV | Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida |
| EPA | Agencia de Protección Ambiental |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| ISO | Organización Internacional de Normalización |
| MINAM | Ministerio del Ambiente |
| MINEM | Ministerio de Energía y Minas |
| ONG | Organizaciones No Gubernamentales |
| PBI | Producto Bruto Interno |
| PELCAN | Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial |
| PNUMA | Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente |
| REPA | Análisis del Perfil Ambiental y de los Recursos |
| RICV | Red Iberoamericana de Ciclo de Vida |
| SETAC | Sociedad de Toxicología Ambiental y Química |

INTRODUCCIÓN

La economía de un país, y con ella su crecimiento, están sujetos a una serie de actividades productivas, las cuales, son generadoras de ingresos económicos, para el beneficio general de una nación y la subsistencia de sus ciudadanos. Respecto a ello; tanto, los organismos internacionales; como también, los organismos nacionales señalan que uno de los rubros económicos con mayor relevancia de un país es el sector de construcción.

Por un lado, a nivel internacional, el PNUMA (en inglés, *United Nations Environment Programme*, UNEP), señala la importancia del sector de construcción; en tanto, aporta el 10% del Producto Bruto Interno (PBI) global; así también, genera empleos para más de 111 millones de personas (UNEP, 2009). En la misma línea, el PNUMA señala que el sector construcción genera entre el 5 y el 10% de los empleos y aporta del 5% al 15% del PBI de un país (UNEP, 2007). Por otro lado, a nivel nacional, en el Perú, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en un informe realizado en el 2019, señaló que en octubre de dicho año, el PBI del país mostró un incremento del 1.18%, debido al aumento de consumo interno de cemento en 6.14% dentro del sector construcción (INEI, 2019).

Sin embargo, pese al impacto económico positivo señalado, la práctica constructiva acarrea a su vez, un impacto ambiental negativo; ello se debe a que, desde una perspectiva estadística, el sector de la construcción es responsable del 50% de los recursos naturales empleados, del 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50% del total de los residuos generados (Annik et al, 1996). Es por ello que la práctica de la construcción es uno de los principales actores en el proceso de modificación del planeta y de contaminación, pues es un gran consumidor de recursos y generador de desechos (Acevedo et al, 2012).

Dicho lo anterior, podemos señalar que una de las principales problemáticas ambientales, producidas por el sector de construcción, es la referida al consumo de los recursos naturales o de las materias primas. Respecto a ello, los cálculos conservadores; llevados a cabo, por el PNUMA (UNEP) muestran que el sector de construcción consume mundialmente un total aproximado de 40 billones de

toneladas al año, de agregados, lo cual equivale al doble de la cantidad anual de sedimentos arrastrados por todos los ríos del mundo (UNEP, 2014).

En nuestro país, particularmente, según un estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se muestra que durante el periodo de tiempo abarcado, desde el año 2011 hasta el año 2015, la explotación del hormigón o agregados naturales ha cursado un aumento progresivo; alcanzando en el 2016, los 7 millones 203 mil toneladas, representando el 12.7% extracción no metálica nacional (MINEM, 2016). Es por tal motivo, que el MINEM ha estimado un aumento continuo de la extracción del hormigón, para los siguientes años venideros. La figura 1.1 muestra el aumento progresivo señalado, durante los años 2011-2015.

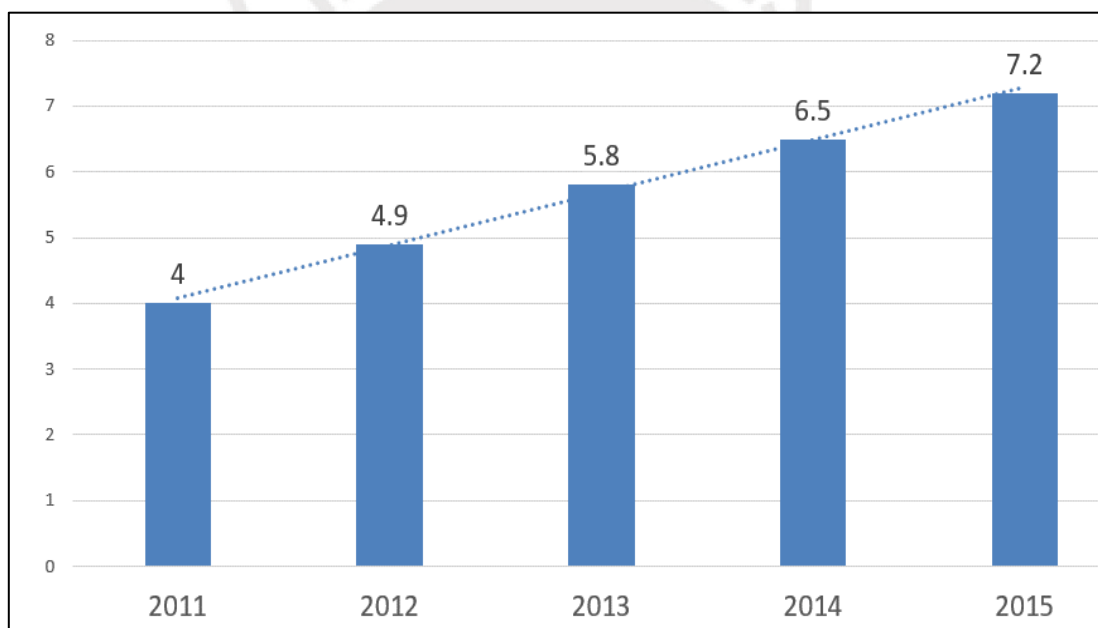


Figura 1.1: Extracción de hormigón (Millones de toneladas métricas) entre los años 2011-2015. Fuente: MINEM (2016).

Así también, otra de las problemáticas principales producidas por el sector de construcción, las cuales generan una afectación al medio ambiente, es la referente a la generación de residuos provenientes de las construcciones y demoliciones; ello en tanto, dichos desechos son destinados a los vertederos o botaderos informales. En el Perú, la Defensoría del Pueblo reportó que el 71.52% de los residuos son llevados a botaderos ilegales a cielo abierto o quemados

generando un impacto negativo en el ambiente, además solo el 3.45% de los residuos son destinados a reciclaje (MINAM, 2012). Así mismo, tal como se muestra en la figura 1.2, el Ministerio del Ambiente (MINAM), en un informe realizado en el año 2014, determinó que del total de los residuos declarados por los sectores económicos, el sector construcción representó el 9.37% del total de residuos (MINAM, 2014).

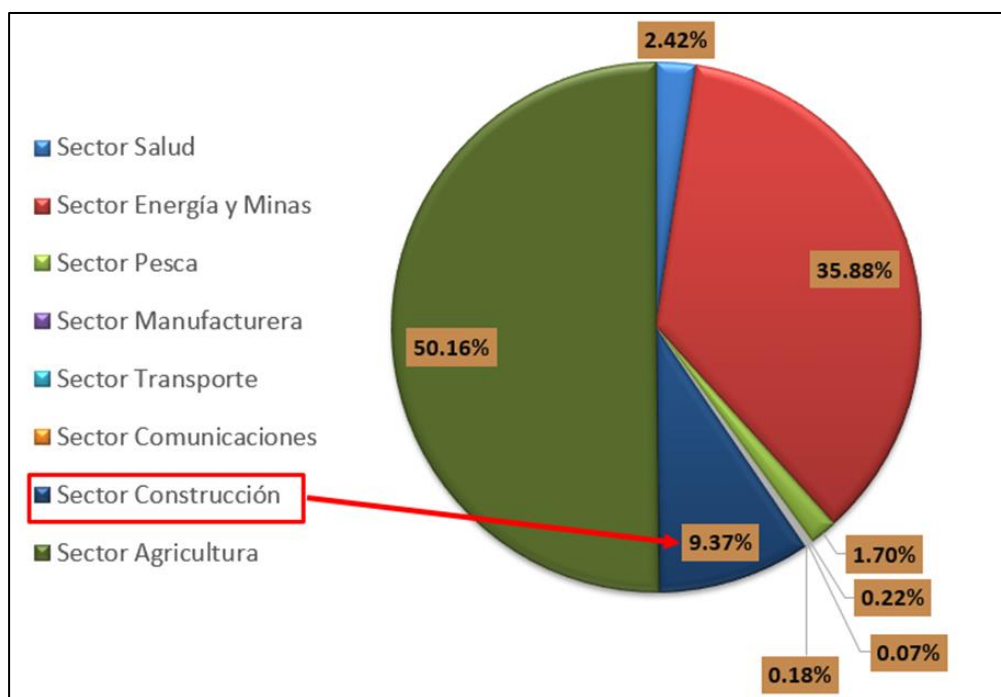


Figura 1.2: Porcentaje de residuos por sectores declarados en el 2014.

Fuente: MINAM (2014).

De todo lo anterior señalado, someramente; podemos notar que el sector de construcción es el actor principal de ciertas problemáticas ambientales globales y nacionales; como, la referida al gran consumo de los recursos naturales (mediante la extracción y/o explotación de materias primas); y lo referente a la generación de grandes cantidades de desechos (producto de las prácticas de construcción y demolición). Claramente, dichas problemáticas mencionadas, generan un impacto negativo en el habitat donde vivimos.

Es por ello que, frente a estas actividades de construcción que afectan considerablemente al medio ambiente, se deben difundir y proponer prácticas sostenibles; con el fin, de que se incremente el número de regularizaciones

relacionadas a la disposición de los residuos sólidos, a la extracción de la materia prima y a otros problemas afines que generen un impacto negativo en el ambiente. Un medio ideal para brindar un soporte adecuado a estas prácticas sostenibles, es la utilización de metodologías, basadas en estándares internacionales; como es el caso, del Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

El ACV es una metodología encargada de calcular de manera cuantitativa el impacto de un producto o un servicio en el medio ambiente (ISO, 2006). Este método se encuentra reglamentado por las normas internacionales ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), e ISO 14044 (Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices); las cuales, han sido estipuladas por la Organización Internacional de Estandarización (en inglés, *International Organization for Standardization*, ISO). Así también, uno de los beneficios primordiales del ACV es que es un método de análisis completo; en tanto, examina cada una de las fases de un producto; es decir, desde la adquisición de las materia primas hasta la gestión de los residuos producidos por el uso del objeto (Hellweg et al, 2014).

En la presente investigación, se utiliza como herramienta el mencionado método de ACV; a fin de comparar dos tipos de productos; los adoquines convencionales, los cuales son fabricados a partir de las canteras de los ríos. Así también, los adoquines reciclados, los cuales son fabricados con materiales provenientes del reciclaje de la construcción y demolición. Ello, con el objetivo de dar a conocer cuál de estos productos o materiales de construcción, cuenta con un menor impacto en el medio ambiente.

En el Perú, lamentablemente, son pocos los estudios enfocados a contrastar las ventajas y desventajas ambientales que acarrear consigo el uso de; por un lado, productos de construcción convencionales y por el otro, productos de construcción innovadores. Es por ello, que mediante esta investigación se busca fomentar el pensamiento del ciclo de vida de los productos utilizados por el sector de construcción; ya que, con los resultados de dicho análisis; podríamos reparar que existen productos de construcción alternativos, los cuales son menos perniciosos para el medio ambiente; a la par que, cumplen con las Normas Técnicas Peruanas, aprobadas por la Dirección de Normalización.

Al fomentar dicho pensamiento del ciclo de vida de los productos; se busca promover; también, nuevas investigaciones acerca de materiales de construcción sostenibles que sean más permisibles con el medio ambiente y a su vez que reduzcan el impacto ambiental negativo en él. Ya que, si bien es cierto, que las prácticas de construcción generan un impacto económico positivo para nuestro país; no se debe desatender los estudios sobre el impacto ambiental, ocasionado por el sector de construcción.



CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

En el presente capítulo, se desarrollará la revisión literaria del origen del Análisis del Ciclo de Vida, como método de evaluación del impacto ambiental; así mismo, se expondrá la aplicación de esta herramienta, en el sector construcción; principalmente, en los materiales de construcción.

2.1 ORIGEN DEL ACV EN EL MUNDO COMO MÉTODO PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL

Los antecedentes del ACV datan del período de tiempo, conformado entre los años 1960 y 1970, en los cuales el Departamento de Energía de Estados Unidos aplicó por primera vez el concepto de ACV para evaluar la demanda de energía; tal es así, que en 1963, Harold Smith, en la Conferencia Mundial de Energía, presenta los resultados de un estudio sobre el consumo de energía para la elaboración de productos químicos; en tanto, en un inicio, los estudios del ACV se encontraban dirigidos a la eficiencia del consumo de energía (Bishop, 2000).

En 1969, *Midwest Reserch Institute* (MRI), por encargo de la empresa estadounidense Coca Cola, realizó un estudio en el cual no sólo se analizó el consumo de energía; sino también, el consumo de materia prima y el impacto ambiental debido a las emisiones en el proceso de fabricación de los envases, pasándose a denominar lo anterior, como el Análisis del Perfil Ambiental y de Recursos (REPA por sus siglas en inglés), el cual analiza los productos desde la cuna hasta la tumba (Trama y Troiano, 2001).

Entre los años 1970 y 1980, se acentúa el interés respecto a la metodología del ACV en Estados Unidos, debido a la crisis del petróleo, generando un incremento en la cantidad de estudios REPA basados en alternativas para la generación y ahorro de energía que protejan al medio ambiente (Romero, 2003).

Entre los años de 1985 a 1987 disminuyó el interés por el desarrollo de estudios REPA relacionados a la metodología del ACV, debido a que se contaba con un gran número de estudios, los cuales daban solución al problema energético relacionado con la crisis del petróleo y el cuidado del medio ambiente (Chacón, 2008). Sin embargo, en el año 1988, retorna el interés por la metodología del ACV en Estados Unidos, debido al problema de la disposición final de los

residuos sólidos, lo cual conllevó a una mejora continua de la aplicación de la metodología del ACV (EPA, 2006).

En 1990 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, en cooperación con la SETAC (Sociedad de Toxicología Ambiental y Química) estableció el término Análisis de Ciclo de vida o "*Life Cycle Assessment*" para la evaluación de impactos ambientales del producto o servicio (SETAC, 1994).

En 1992 Franklin Associates, usó por primera el concepto de ACV para comparar los impactos ambientales negativos y positivos de los productos. Los resultados del estudio mostraron que los pañales reusables, eran más contaminantes que los pañales desechables; ya que, ocasionaban diez veces más contaminación de las aguas, por el uso de detergentes; así mismo, consumían tres veces más energía (Franklin Associates, 1992).

En 1997, El Comité de Gestión Ambiental de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) publicó la norma ISO 14040 titulada "*Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*" (Gestión Ambiental-Análisis del Ciclo de Vida-Principios y Marco de Referencia); con el fin, de estandarizar la herramienta de ACV, siendo complementada, a su vez, con las normas ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 (ISO, 1997). En la actualidad, la metodología del ACV se rige por las normas ISO 14040, la cual contiene los principios y el marco de referencia; así mismo, por la ISO 14044, la cual posee los requisitos y las directrices necesarios para el ACV de un producto o servicio (ISO, 2006).

En el año 2001 se logró consolidar la aplicación de la metodología del ACV, con la fundación del Centro Americano para la Evaluación del Ciclo de Vida (*American Center for Life Cycle Assessment, ACLCA*), en Estados Unidos. Esta organización fue la encargada de difundir la aplicación del ACV mediante talleres, proyectos específicos y conferencias, en los cuales se tuvo la presencia del propio gobierno, de diferentes empresas del sector industrial y otros grupos empresariales, públicos y privados (Chacón, 2008).

En el 2002 surge la "Iniciativa Global de Ciclo de Vida" promovido por la SETAC y la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas), la cual busca fomentar

el pensamiento del ciclo de vida con tendencias hacia el desarrollo sostenible; por lo que, a nivel mundial se generó, entre los años 2002 y 2006, la creación de distintas asociaciones; tales como, *Indian Society for LCA*, *Korean Society for LCA*, *ALCA* (Sociedad de Ciclo de Vida Australiana), entre otras (Curran, 2012).

En Europa, principalmente Alemania, Reino Unido e Italia, los trabajos REPA elaborados en Estados Unidos por el doctor Bruce Hannon, de la Universidad de Illinois, cimentaron el desarrollo de los estudios de la metodología del ACV (Baunmann, 2004). Posteriormente, el factor importante para lograr la consolidación del ACV fue la incorporación de este, en las políticas, programas y aplicaciones de principios ambientales; tales como el Eco-Diseño, Eco-Etiquetado, Huella de Carbono, Declaración Ambiental de Productos y Gestión de Residuos Sólidos (Lozano, 2014).

Respecto a lo anterior, dentro de las políticas relacionados al ACV, en 1992, la Unión Europea estableció el primer sistema europeo de etiquetado ecológico establecido por la Comisión Europea y la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (*World Business Council for Sustainable Development – WBCSD*) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2015).

Asimismo, en el 2000, como respaldo a la Política Integrada al Producto de la Unión Europea, se publicó el estudio “Eco-diseño: estado del arte Europeo”, dicha exploración recopilaba las experiencias, en quince países, de la aplicación del ACV para el diseño y métodos empleados para la producción de productos (Tucker et al., 2000).

Así también, en el 2008, dentro de la política de Gran Bretaña se publicó la norma PAS 2050:2008, referente a la Verificación de la Huella de Carbono, en la cual se utiliza información proporcionada por el Análisis de Ciclo de Vida (Lozano, 2014).

En el 2010, en Europa, el Instituto de Medioambiente y Sostenibilidad (*Joint Institute for Environment and Sustainability – IES*), publica la Referencia Internacional del Sistema de Información para el Ciclo de Vida (*International Reference Life Cycle Data System – ILCD*), el cual consiste en una serie de

manuales para la aplicación del ISO 14040, disponiéndose en ellos, la Base de Datos Europea de Referencia de Ciclo de Vida (*European Reference Life Cycle Database - ELCD*) (Lozano, 2014).

En los países Latinoamericanos, el proceso de difusión de la metodología de ACV se desarrolló de manera pausada, en comparación con Estados Unidos y los países europeos; debido a la poca inversión para ejecutar estudios del ACV y la falta de personal capacitado en el tema (Quispe et al., 2017).

Sin embargo, en el 2003 se crea La Asociación Latinoamericana para la Evaluación del Ciclo de Vida (ALCALA por sus siglas en inglés), con el objetivo de realizar eventos, actividades y proyectos relacionados a la metodología del ACV, lo cual se concretiza mediante la realización de la primera Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica: CILCA-2005, realizada en Costa Rica (ALCALA, 2017). A partir de esa fecha la organización del CILCA, se realiza cada 2 años, en diferentes países de Latinoamérica; como es el caso de Perú, el cual organizó la CILCA 2015 y Costa Rica, organizador de la última CILCA, en el 2019.

El objetivo de dichas conferencias es difundir el pensamiento de ciclo de vida y sus herramientas asociadas; teniendo en cuenta ciertos ejes temáticos; tales como, edificaciones y ciudades sostenibles; turismo sostenible; acuerdos y políticas internacionales; gestión sostenible de recursos naturales críticos; gestión de recursos energéticos; economía circular y gestión sostenible de residuos, entre otros (CILCA, 2019).

En el Perú, el departamento de Ingeniería de la PUCP crea la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), en el 2005, con el objetivo principal de promover la aplicación de la metodología del ACV y otras herramientas ambientales; para lo cual, realiza capacitaciones y publicaciones; así también, la PELCAN representa al país en las diferentes conferencias nacionales e internacionales sobre ACV (PELCAN, 2017a).

Las publicaciones realizadas por PELCAN están relacionadas, no solo al sector construcción; sino también, a otros sectores económicos. Por ejemplo, en el sector Energía, el estudio realizado por Vázquez-Rowe et al. (2015), en el cual

se compara la matriz eléctrica peruana con la española y la investigación realizada por Quispe et al. (2019), en la cual se analiza el uso de la cáscara de arroz como fuente de energía; en el sector Agricultura, el proyecto realizado por Vázquez-Rowe et al. (2016a), en el cual se evalúa el ACV de productos agrícolas y en el sector pesquero, el proyecto realizado por Vázquez-Rowe et al. (2016b), en el cual se cuantifica la huella de carbono mediante el uso de un software en los productos pesqueros.

Por otro lado, respecto a la inclusión de la metodología del ACV en la política peruana, la Ley General del Ambiente (Ley 28611), hace mención en el artículo 75, el concepto de ciclo de vida para el manejo de impactos ambientales (Ley General del Ambiente, 2005). Asimismo, en el 2013 se publica la Norma Técnica Peruana NTP-ISO 14044, la cual contiene las especificaciones referentes a la definición del objetivo y alcance; el análisis del inventario y la evaluación del impacto. Posteriormente, en el 2017, de forma complementaria se publica la NTP-ISO 14040, la cual incluye la etapa de interpretación del ACV (INACAL, 2018).

En el 2019, el Ministerio del Ambiente (MINAM), la PELCAN y la UNEP logran el lanzamiento de la base de datos del ciclo de vida nacional peruano denominado "Perú LCA"; con la finalidad de proporcionar información sobre cómo los resultados de los estudios de ACV pueden ser aplicados en las actividades diarias y a los diferentes sectores económicos (Vázquez-Rowe et al., 2019).

2.2 APLICACIÓN DEL ACV EN EL SECTOR CONSTRUCCIÓN

La metodología del ACV, en el sector de construcción, desarrolla el análisis de los materiales de construcción, las infraestructuras y los procesos constructivos; con el fin, de lograr la eficiencia energética, el consumo responsable de materia prima, la reducción de emisiones y el manejo adecuado de los residuos sólidos (Bartl, 2014).

En los años 90, los estudios de la metodología del ACV, en el sector de la construcción, aumentan significativamente internacionalmente; sin embargo, en un nivel menos desarrollado, si se contrasta con otros sectores (Khasreen et al., 2009). Ello es debido a que, en comparación con otros productos, la aplicación de la metodología del ACV para definir el impacto medioambiental de un sistema constructivo es más complejo; en tanto, se debe considerar no solo los materiales que los componen; sino también, el proceso constructivo, el transporte, el mantenimiento, el uso de la infraestructura, la demolición, la reutilización, el reciclaje y la eliminación de los desechos (Curran, 2012).

Dentro del sector construcción, en las construcciones de las infraestructuras de edificación, la metodología del ACV se aplica en viviendas, oficinas, hospitales, etc. Por ejemplo, el estudio realizado por Keolian et al. (2000), compara una Vivienda Convencional (VC) y una Vivienda Energéticamente Eficiente (VEE), en este estudio se analiza las fases de producción de materiales, de construcción, de operación y mantenimiento, y de demolición. Los resultados concluyeron que la VEE consume un 60% menos de energía que VC, donde la fase de uso (operación y mantenimiento) representa el mayor consumo de energía; además, el potencial de calentamiento global generado por la VEE es 63% menos que la VC en el ciclo de vida.

Siguiendo la misma línea de investigación, el estudio realizado por Guggemos y Horvath (2005), compara un edificio de concreto armado, con otro edificio de sistema estructural de acero. En este estudio se analiza las fases de manufactura de materiales, construcción, uso y fin de vida. Los resultados concluyeron que la diferencia de impacto ambiental en el ciclo de vida de ambos edificios no es significativa; debido a que, la desigualdad producida por la demanda de energía

y emisiones de CO₂ en la etapa de manufactura, por el edificio de sistema estructural de acero, es compensada en las etapas de construcción y fin de vida, por el edificio de concreto armado.

De igual forma, la investigación realizada por Kahhat et al. (2009), compara el impacto ambiental en el ciclo de vida de distintos sistemas de muros exteriores de una vivienda, en este estudio se consideraron una gran variedad de indicadores ambientales; como por ejemplo, el potencial de calentamiento global, el uso de recursos, la emisión de desechos sólidos, entre otros. Entre los tipos de sistemas de muros se consideraron los contruidos con bloques de concreto, concreto vertido en el lugar, concreto aislado y madera. Los resultados de la investigación concluyeron que los muros de concreto aislado tuvieron un mayor impacto en la etapa de manufactura y construcción; en la etapa de mantenimiento y energía operativa, el muro de madera presentó el mayor consumo de energía y en la etapa de fin de vida, los resultados mostraron valores poco significativos, en comparación con las etapas anteriores.

En lo referente a las construcciones de las infraestructuras viales, el estudio realizado por Stripple (2001), adaptó por primera vez, la metodología del ACV para su aplicación en una carretera ubicada en Suecia; en esta investigación se consideran condiciones únicas; tales como, localización, extensión, complejidad de procesos, condiciones meteorológicas, intensidad de tráfico y otros, los cuales se analizan en las etapas de construcción, mantenimiento y tráfico. Los resultados del estudio concluyeron que el mayor impacto ambiental respecto a las emisiones de CO₂, se da en la etapa de tráfico, por la alta circulación de vehículos.

Siguiendo la misma línea, el estudio realizado por Zapata et al. (2005), compara el pavimento de concreto armado y el pavimento asfáltico, en este estudio se analiza las etapas de extracción de materiales o manufactura, de construcción, operación, de mantenimiento y de fin de vida. Los resultados del estudio concluyeron que el mayor impacto ambiental para el caso del pavimento de concreto armado, se da en la etapa de extracción de materiales o manufactura, debido al mayor consumo de energía, y para el caso del pavimento asfáltico, se da en la etapa de construcción.

La metodología del ACV en el sector construcción se viene aplicando en otros tipos de infraestructuras, como las hídricas; por ejemplo, en el estudio realizado por Emmerson et al. (1995), se analizó el impacto ambiental en una planta de tratamiento de aguas residuales, para las categorías de consumo de energía y potencial de calentamiento global.

Así también, con respecto a las infraestructuras de telecomunicaciones, en el estudio realizado por Scharnhorst et al. (2006), se analizó el impacto ambiental en la construcción de redes de telefonía móvil, para las categorías de impacto de potencial de calentamiento global, eco-toxicidad y uso de la tierra.

En el Perú, se viene desarrollando investigaciones de ACV relacionados a la construcción de infraestructuras de edificaciones; como por ejemplo, el estudio de García (2014), en el cual se cuantifica el impacto ambiental generado por una vivienda unifamiliar en Lima a lo largo de su ciclo de vida; considerando como categorías el consumo de energía primaria, el potencial de calentamiento global, el consumo de combustible fósil, acidificación, eutrofización, entre otros. Los resultados de este estudio concluyeron que el mayor impacto ambiental para la etapa de operación y mantenimiento se obtiene en las categorías de consumo de energía primaria y consumo de combustible fósil; mientras que, para la etapa de manufactura, el mayor impacto ambiental se da en los indicadores de acidificación y potencial de calentamiento global.

Siguiendo la misma línea, el estudio realizado por Cáceres (2016), compara dos modelos de edificaciones multifamiliares a lo largo de su ciclo de vida, el primer modelo es una edificación multifamiliar de 8 pisos con un sistema estructural de ductilidad limitada, con un nivel socioeconómico C y el segundo modelo es una edificación multifamiliar de 4 pisos con un sistema estructural dual de pórticos y placas de un nivel socioeconómico A. Los resultados de esta investigación concluyeron que el mayor impacto ambiental, se da en los departamentos de la edificación multifamiliar del nivel socioeconómico A; en contraste, con los departamentos del nivel socioeconómico C, debido al mayor consumo energético y mayor emisión de CO₂.

En lo referente a las construcciones de las infraestructuras viales en el Perú, el estudio realizado por Larrea et al. (2017), cuantifica el impacto ambiental

generado por la construcción de una carretera en una zona de amortiguamiento del Manú, en Madre de Dios, en este estudio se analiza las etapas construcción, mantenimiento y tráfico; considerando categorías como el cambio climático, formación de material particulado, eutrofización, agotamiento de ozono, entre otros. Los resultados de este estudio concluyeron que el mayor impacto ambiental se da en la etapa de construcción; por encima, de la etapa de tráfico, en las categorías de cambio climático y formación de material particulado, debido a la deforestación y a la emisión de polvo.

De igual forma, el estudio realizado por Verán (2017), cuantifica el impacto ambiental generado por un tramo de la autopista de la Panamericana Sur, en las etapas de construcción, mantenimiento y tráfico; considerando categorías como acidificación, formación de micro partículas, cambio climático entre otros. Los resultados de esta investigación concluyeron que aproximadamente el 99% del impacto ambiental, generado a lo largo del ciclo de vida, en las categorías evaluadas, se da en la etapa de tráfico.

La metodología del ACV en el Perú, también se viene aplicando en otros tipos de infraestructuras aparte de las edificaciones y viales; como por ejemplo, el estudio realizado por Verán y Vázquez-Rowe (2019), analiza los impactos ambientales producidos por la producción energética, en centrales hidroeléctricas a nivel nacional; para las categorías de impacto de potencial de calentamiento global, impactos relacionados al agua, entre otros.

Así también, en la investigación realizada por Torre (2018), se analiza los impactos ambientales producidos durante el ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales, para las categorías de potencial de calentamiento global, potencial de eutrofización, entre otros.

2.2.1 Aplicación del ACV en los materiales de construcción

La aplicación del ACV, enfocado en los materiales de construcción, realiza una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales a lo largo de su ciclo vida; con la finalidad, de obtener información para la empresa productora, permitiéndose realizar mejoras en los procesos, la viabilidad económica y la protección ambiental (Braungart et al., 2005). La mayoría de estos estudios comparan los materiales convencionales con materiales innovadores; abriéndose nuevas líneas de investigación en el eco-diseño y la eco-innovación, lo cual permite nuevos productos constructivos para la sostenibilidad de la construcción (Capuz, 2002). Además, dichos estudios permiten obtener certificaciones como la Declaración Ambiental del Producto o el Eco-etiquetado (UNE, 2006).

El estudio realizado por Maza (2012), identifica las etapas que comúnmente forman parte del ACV de los materiales de construcción, estas son la extracción de materia prima, el proceso de fabricación, el proceso constructivo de la infraestructura, el uso y mantenimiento, la demolición y el reciclaje de residuos; por lo que, la infraestructura construida es parte fundamental del ciclo de vida de los materiales.

Entre los estudios que buscan la innovación en los materiales de construcción (cemento, agregados, ladrillos entre otros), se tiene la investigación realizada en China por Hossain et al. (2016), en ella se compara el impacto ambiental en el ciclo de vida de agregados naturales provenientes de canteras; agregados gruesos provenientes del reciclado de construcción y demolición (C&D); y agregados finos provenientes de residuos de vidrio. Los resultados de la investigación concluyeron que los agregados gruesos provenientes del reciclado de C&D reducen en 65% las emisiones de GEI y en 58 % el consumo de energía no renovable, en comparación, con los agregados naturales gruesos (grava); además, los agregados finos provenientes de residuos de vidrio, reducen en 61% las emisiones de GEI y en 54% el consumo de energía no renovable, en comparación, con los agregados naturales finos (arena). Adicionalmente, la figura 2.1 muestra la comparación de impactos generados en las categorías de salud humana, cambio climático y consumo de energía entre los agregados

naturales (arena y grava) y los agregados provenientes del reciclado de construcción y demolición (C&D).

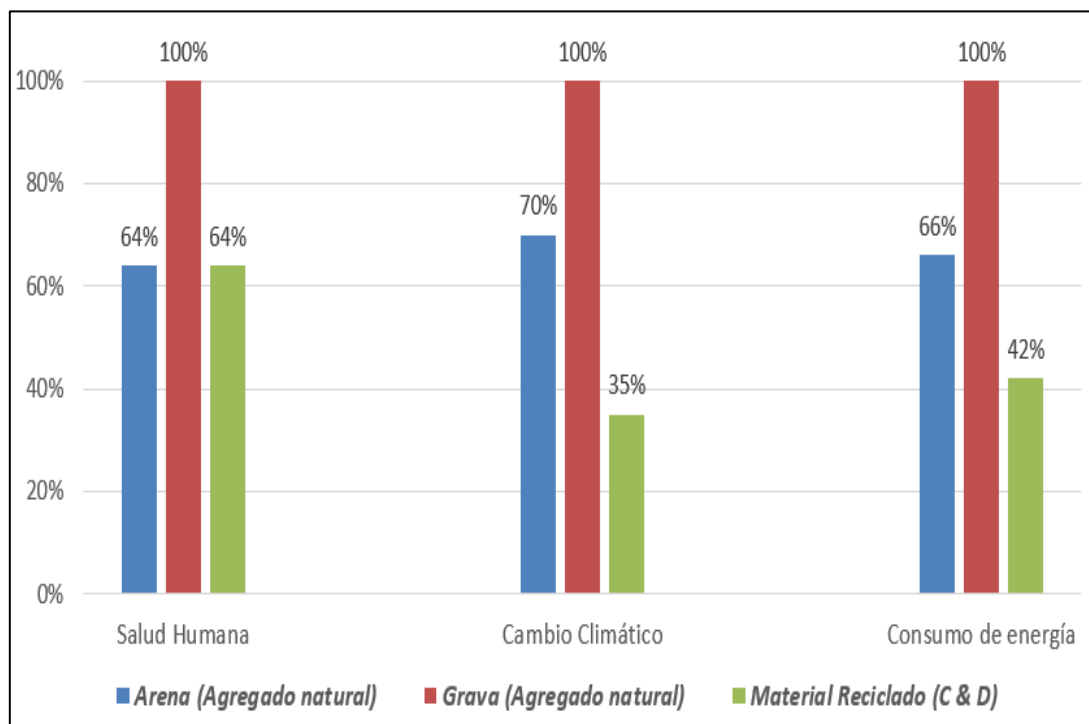


Figura 2.1: Comparación de impactos ambientales entre agregados naturales y agregados del reciclaje de C&D. Fuente: Hossain et al. (2016)

Siguiendo la misma línea, la investigación realizada en China por Hossain et al. (2017), compara el impacto ambiental en el ciclo de vida de la producción convencional del cemento Portland y la producción de cemento ecológico, en la cual se compone de residuos de vidrio para sustituir el 20% del clínker y biocombustible, producidos a partir de desechos de madera. Los resultados de la investigación concluyeron que la producción de cemento ecológico reduce aproximadamente en 17% las emisiones de GEI y en 16% el consumo de energía, en comparación, con la producción de cemento Portland que utiliza materia prima importada y combustibles fósiles.

El estudio realizado en Estados Unidos, por Yazdanbakhsh et al. (2018), compara el impacto ambiental, en el ciclo de vida del concreto producido con agregado natural grueso y el concreto producido con agregado reciclado grueso, proveniente de la C&D. Los resultados concluyeron que el concreto producido con agregado reciclado grueso reduce en 16% la acidificación, en 17% la

formación de smog y en 37% el impacto producido por el transporte hacia la planta de producción; en comparación, con el concreto producido con agregado natural grueso, siempre que se considere dentro del sistema del concreto reciclado, los impactos evitados referidos a los procesos de vertido y transporte hacia el relleno sanitario; ya que, la magnitud de dichos impactos al ser evitados y considerados dentro del sistema, reducen el impacto ambiental del concreto reciclado. La figura 2.2 muestra el sistema de los agregados reciclados, donde se considera los procesos referidos a los impactos evitados que reducen la carga ambiental del material reciclado.

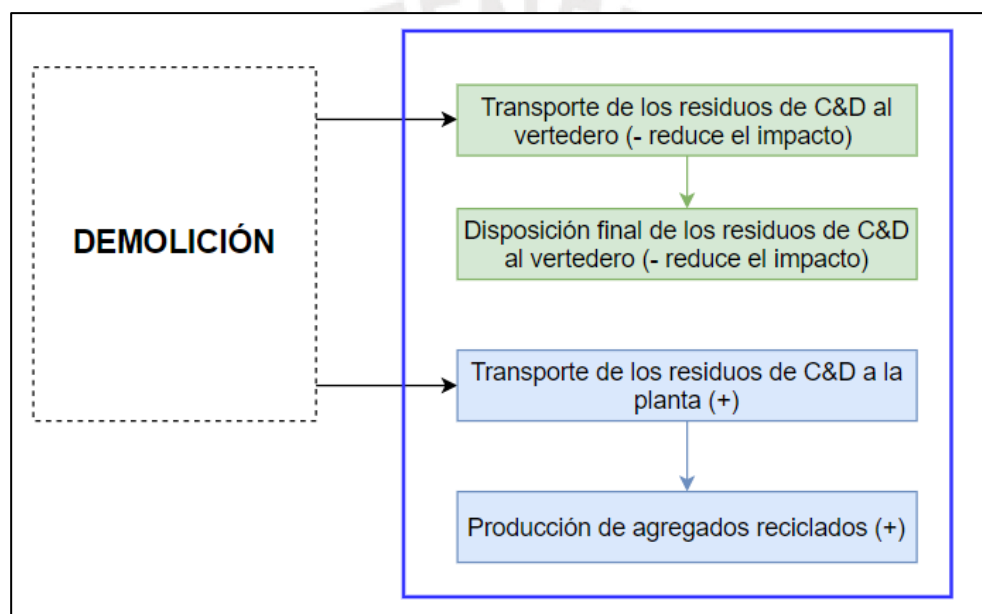


Figura 2.1: Sistema de los agregados reciclados.

Fuente: Yazdanbakhsh et al. (2018)

De igual forma, el estudio realizado en Suiza, por Knoeri et al. (2018), compara el impacto ambiental, en el ciclo de vida del concreto convencional y el concreto producido con agregados reciclados provenientes de la C&D. Los resultados concluyeron que el concreto producido con agregados reciclados reduce en aproximadamente en 70% los impactos ambientales, considerados dentro de la metodología de ecoindicador 99; en comparación, con el concreto convencional, siempre que se considere dentro del sistema del concreto reciclado, los impactos evitados referidos a los procesos de eliminación de desechos, así como también al proceso de recuperación de chatarra de acero.

El estudio realizado en India, por Joglekar et al. (2018), compara el impacto ambiental, en el ciclo de vida de ladrillos de arcilla convencional y ladrillos producidos con desechos industriales, los cuales están compuestos de papel reciclado y cenizas de cáscaras de arroz. Los resultados concluyeron que los ladrillos producidos con desechos industriales reduce en 69% la emisión de GEI y en 75% el potencial de acidificación; en comparación, con los ladrillos de arcilla.

De igual forma, el estudio realizado en España, por Lozano et al. (2018), compara el impacto ambiental, en el ciclo de vida de ladrillos de arcilla convencional y ladrillos BB15, compuesto por un 15% de residuos de cáscara de cebada y 85% de arcilla; en este estudio se analizaron las fases de extracción, transporte, triturado, modelado, secado y cocción. Los resultados concluyeron que los ladrillos BB15 reducen, entre 15% a 20%, los impactos ambientales para todas las categorías de punto medio de la metodología ReCiPe (Cambio climático, acidificación, formación de partículas, entre otros).

En el Perú, a la fecha, no hay un gran número de investigaciones de ACV comparativas entre materiales innovadores y materiales convencionales de construcción; sin embargo, existen publicaciones comparativas entre los materiales que se utilizan comúnmente en las obras de construcción. Entre ellas se tienen, la investigación realizada por Vázquez-Rowe et al. (2018), en la cual se compara las emisiones de GEI (cambio climático), con relación a la producción de tres tipos de cemento, en tres plantas nacionales diferentes. Estos cementos analizados son: el cemento Portland ordinario, cemento con puzolana natural añadida y cemento con escoria de alto horno añadido, siendo estos dos últimos, denominados también como cementos mezclados. Los resultados concluyeron que los cementos mezclados presentan menores emisiones de GEI; en comparación, con el cemento Portland, debido a que la carga ambiental del clínker importado puede aumentar, las emisiones de GEI, hasta en un 12% por unidad de masa.

Asimismo, la investigación desarrollada por la PELCAN (2017b), compara el impacto ambiental en el ciclo de vida de los ladrillos artesanales, los ladrillos mecanizados y los bloques de concreto. Los resultados concluyeron que la

obtención de un ladrillo mecanizado genera un 36% más de emisiones de CO₂, que el ladrillo artesanal; así también, que la obtención de un bloque de concreto genera un 175% y 102% más de emisiones de CO₂, que la obtención de un ladrillo artesanal y un ladrillo mecanizado respectivamente, debido al consumo de cemento y transportes de materiales e insumos a la planta de producción. Sin embargo, la construcción de 1m², de pared construida con ladrillos artesanales, genera un 100% y 50% más de emisiones de CO₂, que la construcción de 1 m² de pared con ladrillos mecanizados y bloques de concreto respectivamente, debido al requerimiento de mayor número de unidades de ladrillos artesanales.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 HIPÓTESIS

En la comparación correspondiente de los siguientes dos productos de construcción; el adoquín reciclado y el adoquín convencional, el producto que genera un menor impacto ambiental será el adoquín reciclado; ya que, mientras, este aprovecha los residuos reciclados de construcción y demolición, para su elaboración; el adoquín convencional emplea para ello, agregados extraídos de las canteras de los ríos.

3.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Comparar los impactos ambientales entre el adoquín reciclado y el adoquín convencional peatonal; utilizando para ello, la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las etapas del ciclo de vida dentro de la fase de Pre-uso (cuna a puerta) y establecer los límites del sistema de la investigación.
- Elaborar el ICV para cada uno de los adoquines, teniendo en cuenta las especificaciones del adoquín peatonal establecidas en la NTP 399.611 y los datos obtenidos en las visitas a la planta de producción de adoquines de la empresa MP RECICLA S.A.C.
- Calcular los impactos ambientales de los adoquines mediante el uso del programa computacional SimaPro.
- Comparar los resultados para ambos adoquines en las categorías de impacto, e identificar cuál de ellos genera un menor impacto ambiental.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente proyecto utiliza como herramientas de análisis de los productos; el método de ACV, basado en la norma ISO 14040; así como también, el programa computacional SimaPro.

La importancia del método de ACV radica en analizar cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto, con lo cual se logra identificar el origen de los impactos ambientales y a la vez, hallar oportunidades para reducir dichas incidencias en el medio ambiente (PELCAN, 2019).

La utilidad del software SimaPro, como soporte para el desarrollo cuantitativo de la investigación, es facilitar el modelamiento de los procesos del ciclo de vida del producto, medir el impacto ambiental e identificar los puntos críticos en cada fase del ciclo de vida (Pré Consultants, 2019).

3.3.1 La herramienta de ACV según la norma ISO

La Organización Internacional de Estandarización, más conocida por sus siglas en inglés, ISO (International Organization for Standardization), es un organismo internacional encargado de la normatividad de estándares de calidad y seguridad de productos y/o servicios (ISO, 2006).

Dentro de las disposiciones estipuladas por esta organización, se encuentran las normas ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), e ISO 14044 (Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices); las cuales, regulan el método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Estas normas internacionales brindan especificaciones sobre los requerimientos para efectuar un ACV; al cual lo definen, como un método encargado de la compilación y evaluación de las entradas, las salidas y los potenciales impactos ambientales de un producto, a lo largo de su ciclo de vida (ISO, 2006).

Así también, la norma ISO 14040 señala que este método del ACV consta de cuatro fases, las cuales se encuentran interconectadas entre sí, de forma no lineal. Tal como se muestra en la figura 3.1, estas fases son las siguientes; en primer lugar, la definición del objetivo y alcances del estudio; en segundo lugar,

el desarrollo del ICV; en tercer lugar, la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida y por último, la interpretación del ciclo de vida (ISO, 2006).

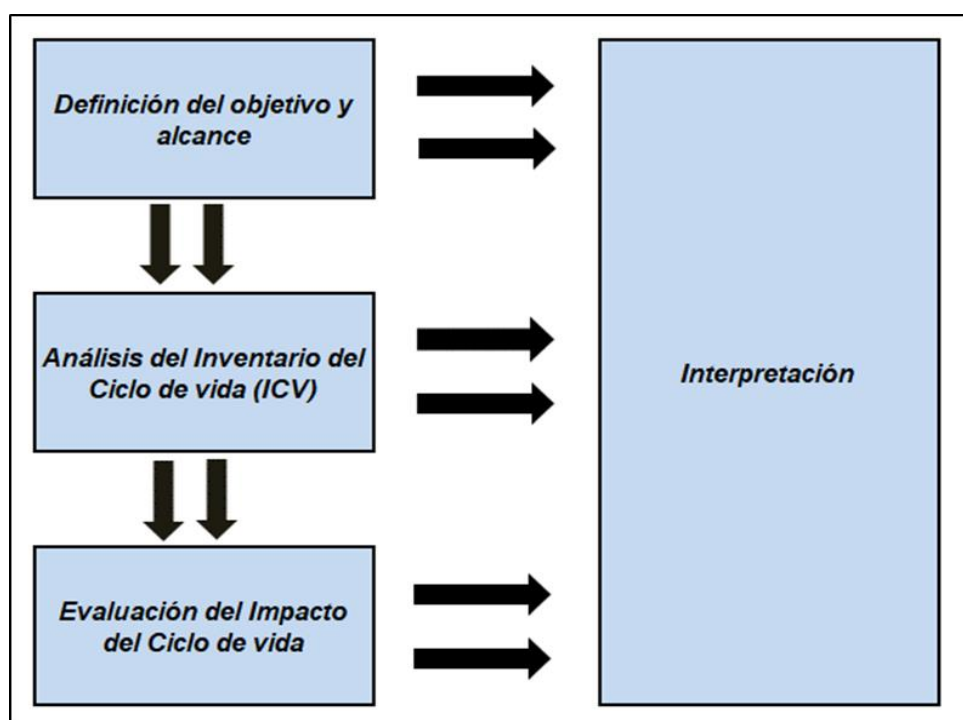


Figura 3.1: Fases del ACV. Fuente: ISO 14040:2006

Dado que, cada fase para el desarrollo del ACV es de suma importancia para la investigación, a continuación, se detalla y define cada una de ellas individualmente.

a) Definición del objetivo y alcance

Según la norma ISO 14040, la definición del objetivo consiste en expresar las razones para elaborar el estudio; detallar la aplicación prevista para el estudio y mencionar el destinatario del proyecto (ISO, 2006).

En la misma línea, la definición del alcance consiste en definir la amplitud, profundidad y detalle del estudio; de modo que, el objetivo se desarrolle óptimamente. Es necesario señalar que, con la finalidad de cumplir con el objetivo original, varios aspectos del alcance pueden requerir de una modificación, a medida que la información sea recopilada; ya que, la herramienta del ACV es una herramienta iterativa (ISO, 2006).

Así mismo, la norma ISO 14040 establece una serie de requerimientos, los cuales deben ser incluidos, para poder definir de manera óptima el alcance, estos requisitos se muestran a continuación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Requerimientos para definir el alcance del ACV

| Requerimientos según la ISO 14040 |
|--------------------------------------|
| 1. Definir el sistema de un producto |
| 2. Unidad funcional |
| 3. Categorías ambientales |
| 4. Requerimiento de datos |
| 5. Suposiciones |
| 6. Limitaciones encontradas |

Fuente: Elaboración propia

Por un lado, con respecto a la unidad funcional, su importancia radica en que permite referenciar y estandarizar las entradas, las salidas y los impactos ambientales involucrados en el ACV; de manera que, se garantice la comparación de los resultados del ACV (ISO, 2006).

Por otro lado, los límites del sistema definen los procesos unitarios que se incluirán en el proyecto; de modo que, no se malgasten recursos en la cuantificación de entradas y salidas que no generan un cambio significativo en los resultados (ISO, 2006).

La figura 3.2 ilustra el sistema comúnmente utilizado en un producto, en el cual se muestran las entradas, las salidas, los procesos unitarios y el límite del sistema.

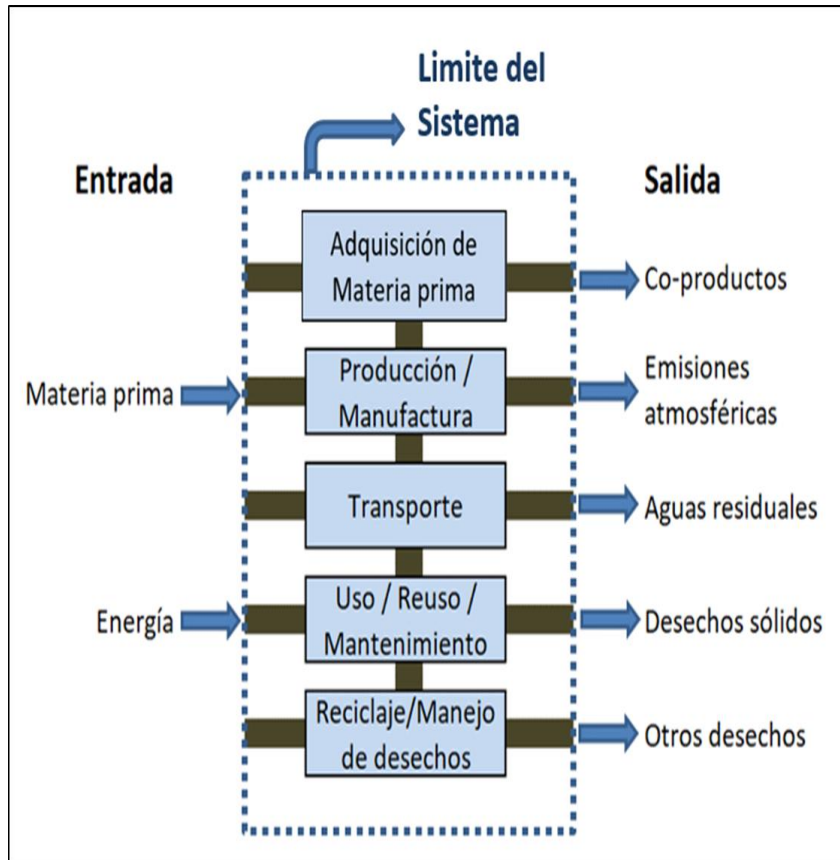


Figura 3.2: Sistema de un producto. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, es necesario señalar que, al momento de desarrollar los límites del sistema, se debe detallar el tipo de estudio que se busca realizar; teniendo en cuenta para ello, el alcance del proyecto.

En el presente proyecto el tipo de estudio a realizar es el ACV de la cuna a la puerta o, como se denomina en inglés, “*cradle to gate*”. Las investigaciones del ACV desarrolladas desde la cuna hasta la puerta están constituidas desde la obtención de materias primas, hasta el proceso productivo desarrollado en la empresa (Haya, 2016).

La figura 3.3 muestra los estudios de ACV, establecidos por el alcance del proyecto, más habituales; tales como, ACV de cuna a cuna, de cuna a puerta, de cuna a tumba y de puerta a puerta.

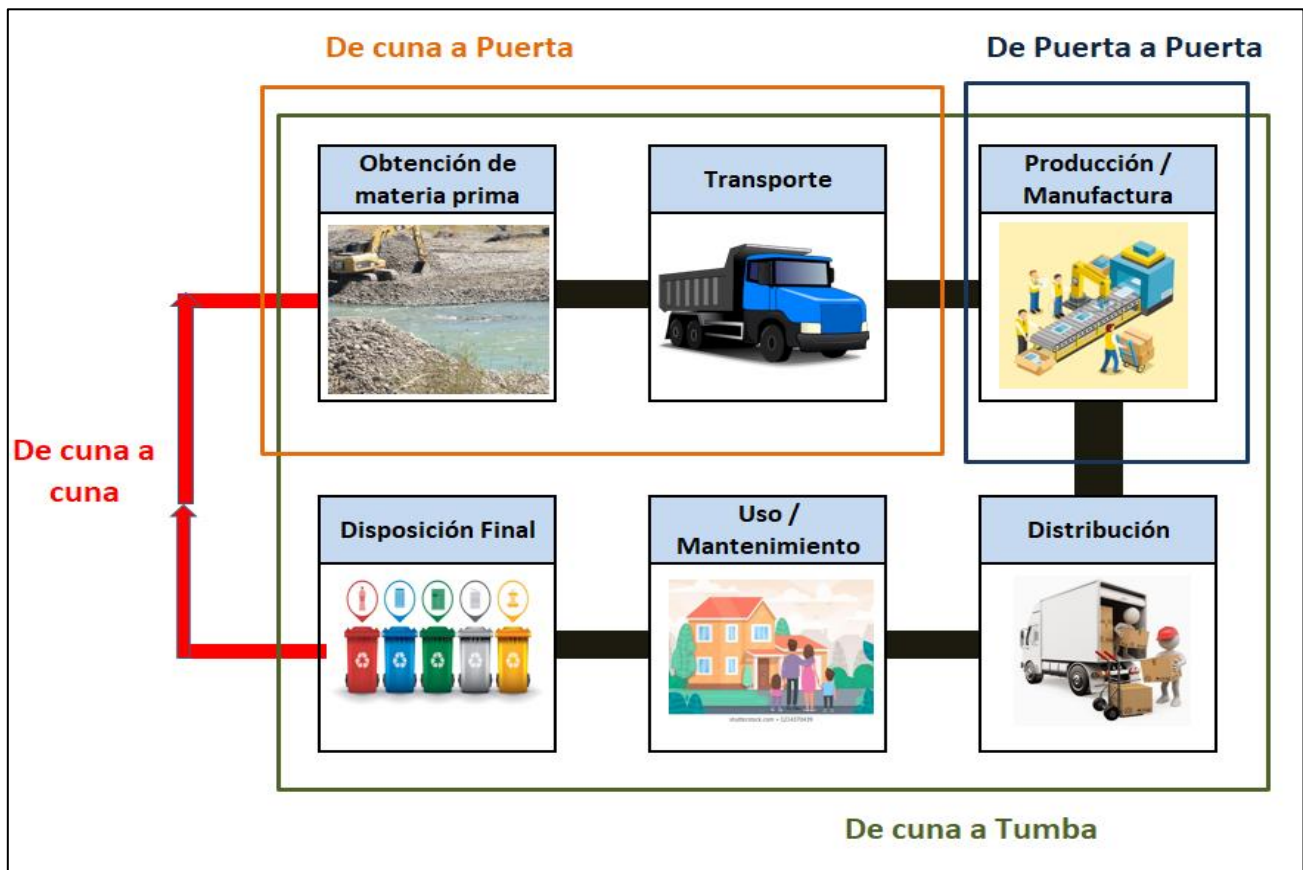


Figura 3.3: Tipos de estudios de ACV determinados por el alcance del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

b) Inventario del ciclo de vida (ICV o LCI)

La presente etapa del ciclo de vida consiste en cuantificar las entradas y salidas del sistema en el proyecto; dentro de ello, se incluye el uso de materia prima, el uso de energía, las emisiones a la atmósfera, los vertidos a la superficie terrestre y acuática, y la generación de residuos (Haya, 2016).

Respecto a ello, la norma ISO 14040 establece que durante el desarrollo del ICV se debe involucrar, de manera iterativa, la recopilación de datos y los procedimientos de cálculos; dado que, a medida que la información se recopila, se tiene un conocimiento más amplio sobre el sistema y se identifican nuevos requisitos y/o limitaciones (ISO, 2006).

De este modo, la figura 3.4 muestra la metodología para el desarrollo del ICV según la norma ISO 14040.

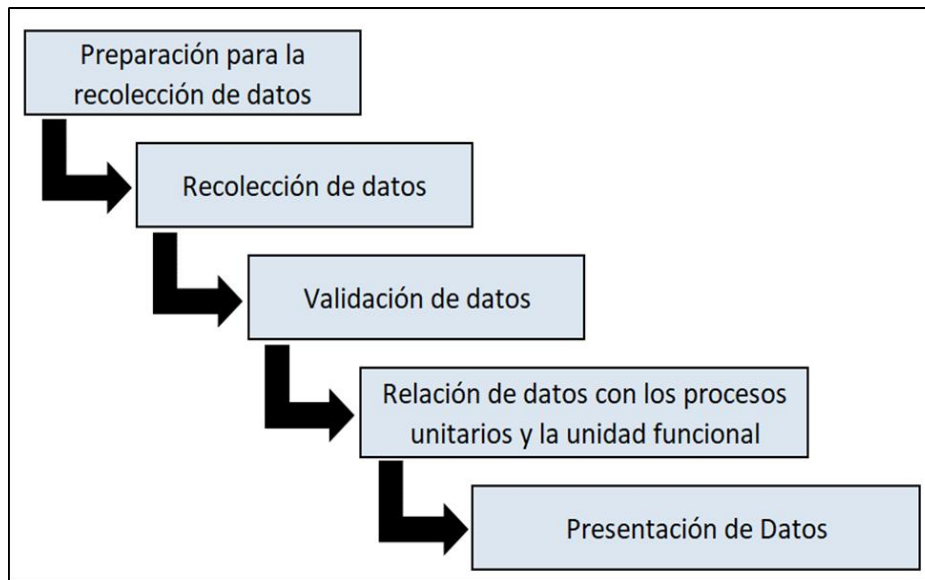


Figura 3.4: Metodología para el desarrollo del ICV.

Fuente: Elaboración Propia

Así también, es necesario señalar que, según lo establecido por la norma ISO 14040, los elementos más pequeños considerados en el análisis del ICV son los procesos unitarios, en los cuales se cuantifican los datos de entrada y salida (ISO, 2006). Estas entradas y salidas son el flujo de materia o energía de un proceso unitario. Adicionalmente, en cada uno de estos procesos unitarios se debe cumplir el balance de masas; es decir, que el flujo de entrada debe ser igual al de salida.

La figura 3.5 muestra el esquema de un proceso unitario con sus respectivas salidas y entradas.

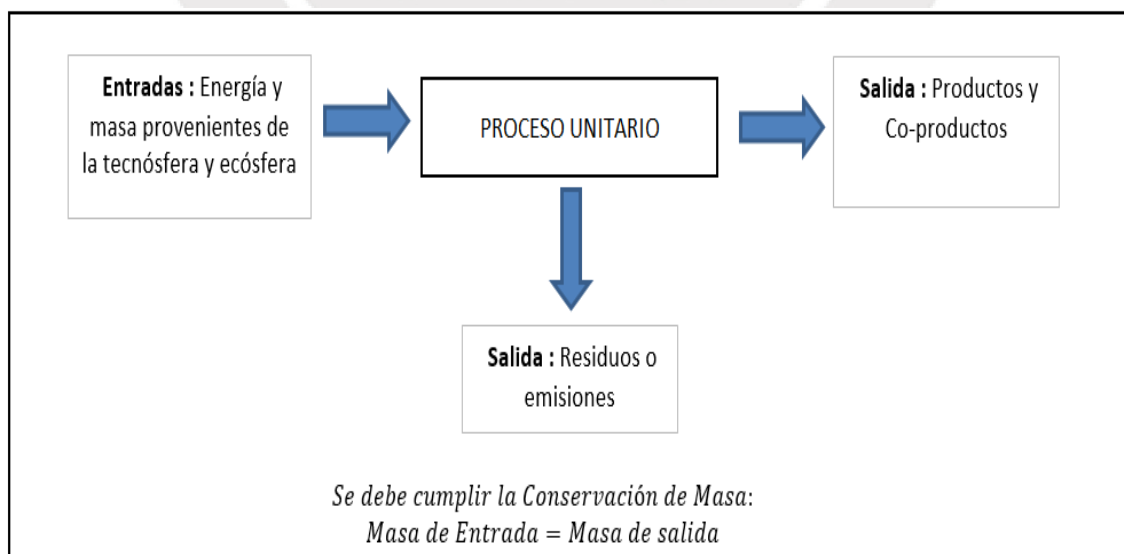


Figura 3.5: Esquema de entradas y salidas para un Proceso Unitario.

Fuente: Elaboración Propia

c) Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV o LCIA)

La etapa de EICV consiste en la comprensión y evaluación de la magnitud e importancia de los impactos ambientales, del sistema en estudio, usando la información recolectada del ICV. De este modo, esta fase implica asociar los datos del ICV con categorías de impactos ambientales específicas e indicadores ambientales; de modo que, se tenga un mayor entendimiento de los impactos ambientales en estudio (ISO, 2006).

Con respecto a las categorías de impactos ambientales mencionadas, estas representan y describen los problemas ambientales primordiales, asociadas a un producto o servicio. La categoría ambiental seleccionada, en el EICV, tiene como representación cuantificable al indicador ambiental (Linfors et al., 1995).

Así también, según lo estipulado en la norma ISO 14040:2006, el procedimiento para obtener los resultados de la EICV radica en 3 elementos obligatorios, los cuales son selección, clasificación y caracterización. Adicionalmente, ciertos estudios de ACV cuentan con elementos opcionales los cuales son normalización, ponderación y agrupación (ISO, 2006).

El primer elemento obligatorio es la selección, la cual consiste en elegir las categorías de impacto, los indicadores ambientales y el modelo de caracterización; además, dicha elección depende del objetivo y el alcance definido al principio de la investigación. El segundo elemento es la clasificación, la cual radica en asignar los resultados del ICV a las categorías de impactos seleccionadas. El último elemento obligatorio es la caracterización, la cual se basa en cuantificar la contribución, de cada compuesto detectado en el ICV, a las diferentes categorías de impacto (Lee et al, 2014).

La figura 3.6 muestra la secuencia para obtener los resultados de la EICV, así como también los elementos obligatorios y elementos optativos establecidos por la norma ISO 14040.

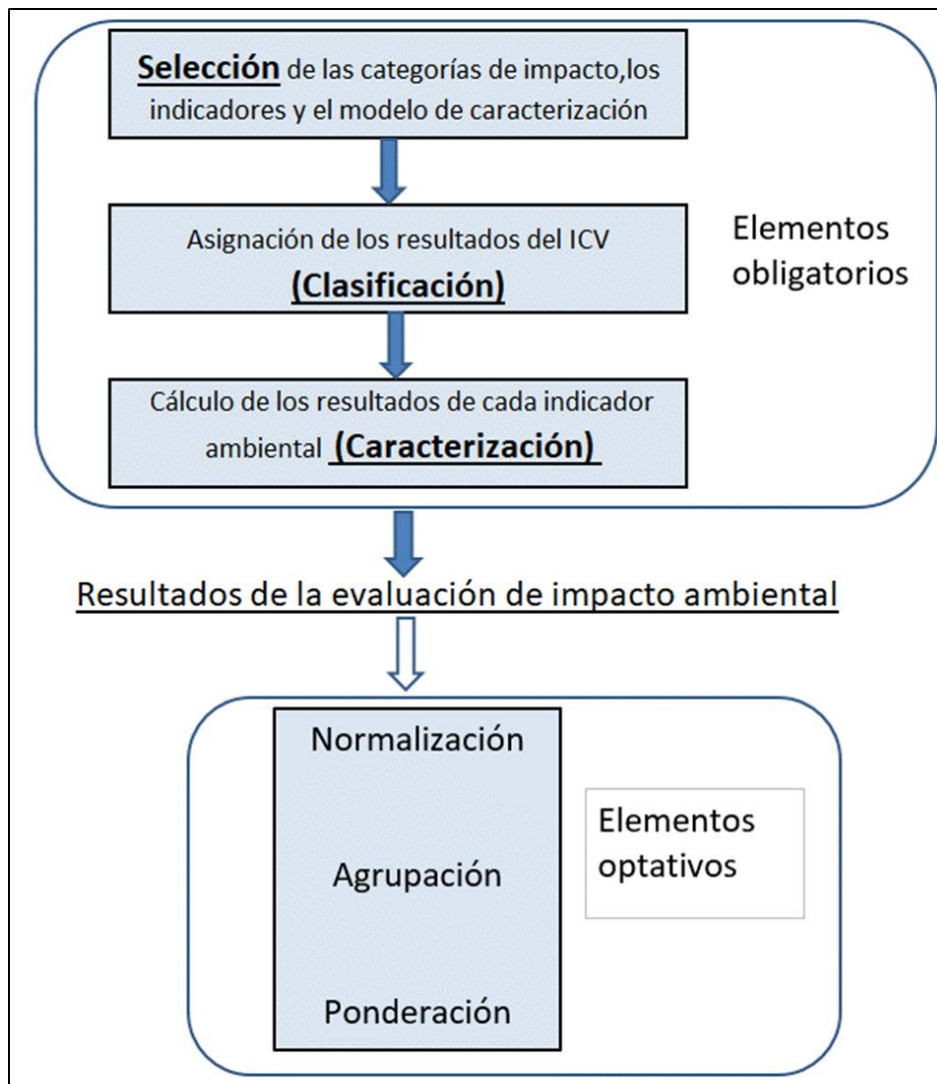


Figura 3.6: Elementos de la fase EICV.

Fuente: Elaboración Propia

Ahora, en el desarrollo de la EICV, las categorías de impacto se encuentran clasificadas dentro de las metodologías utilizadas para el análisis de los impactos ambientales. Las metodologías para la EICV establecen la relación entre cada etapa del ICV y las categorías de impacto correspondientes (Haya, 2016).

Respecto a dichas metodologías de EICV, se han venido desarrollando muchos de ellos, en los últimos años, teniendo como soporte, programas computacionales y bases de datos de inventarios; es por este motivo, que la variedad y los aspectos específicos pueden afectar los resultados finales de la EICV (Zortea et al, 2019).

La tabla 3.2 muestra las metodologías, categorías e indicadores de impacto ambiental utilizadas en la EICV de la presente investigación.

Tabla 3.2: Metodologías, categorías e indicadores de impacto ambiental correspondientes a la investigación

| Metodología | Categorías de impacto | Indicadores |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| IPCC 2013 v1.03 | Potencial de calentamiento global | kgCO ₂ -eq |
| ReCiPe 2016 v1.03 | Agotamiento del mineral | kgCu-eq |
| Cumulative Energy Demand (CED v1.11) | Consumo de energía primaria | MegaJoule |

Fuente: Elaboración Propia

Es necesario resaltar que las metodologías benefician considerablemente el desarrollo de la EICV; debido a que, cuentan con una gran variedad de categorías ambientales que optimizan la interpretación de los resultados; a su vez sus variables se encuentran automatizadas, dentro de los programas computacionales, como el SimaPro. Por este motivo, a continuación se definen y detallan las especificaciones de las metodologías utilizadas en la presente tesis.

Metodología IPCC 2013

La metodología IPCC 2013 v1.03, desarrollada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, es la encargada de especificar y listar los factores del cambio climático en un plazo de 20 y 100 años (Pré Consultants, 2019). Asimismo, esta metodología proporciona datos actualizados de los factores de emisión vinculados a un servicio o producto; así como también, permite determinar las fuentes generadoras de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019).

En la presente investigación, se utiliza la metodología IPCC 2013 GWP 100a v1.03, dentro del programa SimaPro 8.05; de esta manera, se detalla la versión utilizada por el programa y la proyección temporal del estudio. Teniendo en

cuenta las especificaciones para el proyecto, la presente metodología evaluará el potencial de calentamiento global producido en un plazo de 100 años, para el ciclo de vida de los adoquines en estudio.

Metodología CED

La metodología CED v1.11, cuyas siglas en español significan “Consumo de Energía Primaria”, fue desarrollada por Ecolnvet v1.01 y expandida por Pré Consultants (PréConsultants 2019). Esta metodología tiene como objetivo calcular el aporte de energía primaria para la generación de un producto; teniendo en cuenta, los procesos de obtención, producción y disposición final. Por este motivo, se señala que la metodología CED es similar al ACV, sobretodo en la etapa del ICV (Kugeler et al, 2000).

En el presente proyecto, dentro del software SimaPro 8.05, la metodología CED v1.11 se encarga de calcular de manera directa la energía primaria consumida, en Mega Joules (MJ). Así también, esta metodología permite analizar el consumo de diferentes tipos de combustibles y fuentes energéticas durante el ciclo de vida del producto. De este modo, la metodología CED v1.11 evaluará el consumo de energía primaria en la fase de Pre-uso de cada uno de los adoquines en estudio.

Metodología ReCipe 2016

La metodología ReCipe 2016 v1.03 es la versión extendida y actualizada de la metodología ReCipe 2008. Así también, esta metodología es sucesora de los métodos Eco-indicator 99 y CML-IA; ya que, la metodología ReCipe integra el “enfoque orientado a problemas” del CML-IA y el “enfoque orientado a daños” del Eco-indicator 99 (Pré Consultants, 2019).

Por un lado, el enfoque orientado a problemas define las categorías de punto medio o “*midpoints*”; por otro lado, el enfoque orientado a daños define las categorías de punto final o “*endpoints*”.

La diferencia entre ambas categorías radica en que las categorías de punto medio analizan la intervención ambiental en un marco específico y detallado; como por ejemplo, el calentamiento global o el agotamiento de combustible; por

otra parte, las categorías de punto final analizan los impactos ambientales de manera más genérica y global (Vallejo, 2004).

La figura 3.7 muestra las categorías de impacto de punto medio y final incluidos en la metodología ReCipe 2016 v1.03; en tanto, esta metodología, agrupa las categorías de impacto de punto medio, en tres categorías de impacto de punto final; las cuales son salud humana, ecosistema y escasez de recursos.

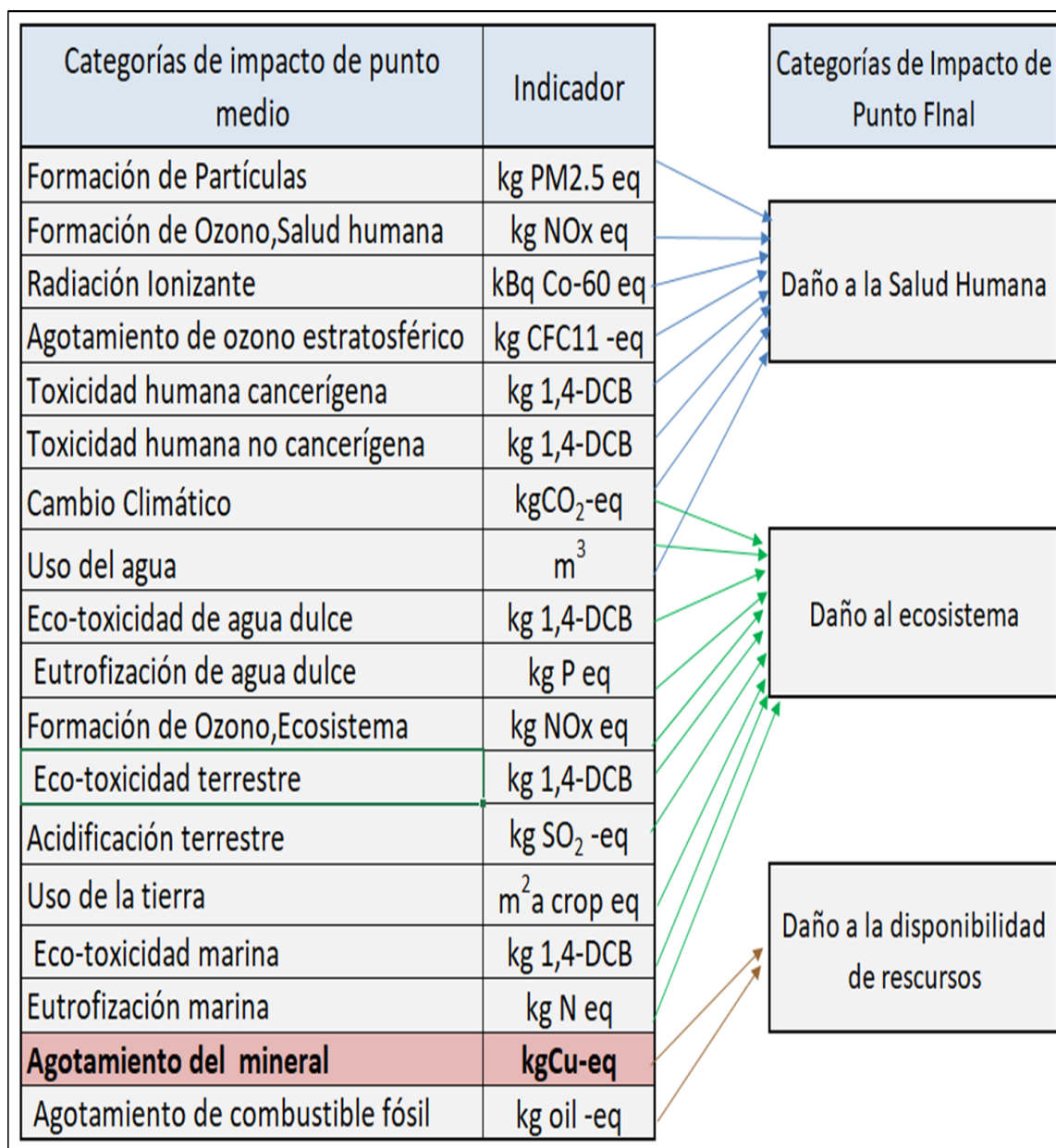


Figura 3.7: Categorías de punto medio y final de ReCipe2016 v1.03

Fuente: Pré Consultants 2019

En el presente estudio, de todas las categorías de impacto de punto medio de la metodología ReCiPe 2016, se ha seleccionado la categoría denominada “agotamiento de recursos minerales” (vinculada al “daño a la disponibilidad de recursos”). Ello en tanto, es relevante para la presente investigación; ya que, en dicha categoría hace énfasis especialmente en el impacto generado por la extracción de minerales como los agregados naturales, los cuales son comparados con los agregados reciclados, obtenidos de los vertederos.

La razón por la cual no se presentan los resultados de las demás categorías de punto medio, es debido a que abordan problemas específicos que no están vinculados al agotamiento y extracción de materias primas. Sin embargo, se presentan los resultados de la categoría de cambio climático, que repercute y brinda una idea general tanto del “daño al ecosistema” como del “daño a la salud humana”, el cual es analizado utilizando la metodología de IPCC 2013; asimismo la categoría de punto medio de agotamiento de combustible fósil, que es parte de las fuentes energéticas, es analizado dentro de la metodología CED.

Ahora, para llevar a cabo la evaluación de la mencionada categoría que ha sido elegida, “agotamiento de recursos minerales”, se utiliza la metodología ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.03, la cual se encuentra en el programa SimaPro 8.05. Es necesario señalar que, para el presente estudio, la perspectiva de la metodología ReCiPe es de tipo jerárquico (H); este enfoque se encarga de explicar que los daños producidos en el ambiente, por la categoría de impacto seleccionada, pueden ser evitados en un plazo promedio, realizándose buenas prácticas que favorezcan la preservación ambiental. Asimismo, si es que no hubiese ninguna especificación o requerimiento previo, esta perspectiva será considerada por defecto (Ecoraee, 2013).

d) Interpretación

La presente fase del ACV consiste en interpretar de manera conjunta los resultados obtenidos en el ICV y la EICV; de modo que, dichos resultados permitan llegar a conclusiones, explicar las limitaciones y proporcionar recomendaciones, respaldadas en el alcance y el objetivo definidos en este proyecto (ISO, 2006). Así también, al ser esta etapa de interpretación, un

proceso iterativo de revisión del ACV y su respectivo alcance; es posible que se pueda discutir los resultados, modificar el sistema del proyecto, mejorar o incluir procesos y actualizar el ICV.

3.3.2 Software para el desarrollo de ACV

En los últimos años se ha ido desarrollando una gran variedad de programas computacionales facilitadores del desarrollo del método de ACV, especializados en diferentes objetos de estudios; como por ejemplo, el *Athena Impact Estimator for buildings software*, utilizado para estudiar el impacto ambiental producido por los materiales de construcción de edificaciones residenciales y el SimaPro, el cual será utilizado en el estudio y detallado en las siguientes líneas.

El programa computacional aplicado en la presente investigación es el software SimaPro 8.05, el cual brinda soporte en la creación de procesos del ICV y realiza la evaluación cuantitativa del impacto de ciclo de vida de las categorías seleccionadas (Pré Consultants, 2019).

SimaPro 8.05

El software SimaPro 8.05, desarrollado por la empresa holandesa *Pré Consultants*, tiene como finalidad calcular los impactos ambientales basándose en los lineamientos establecidos por la ISO 14040 (Pré Consultants, 2019).

De este modo, dicho programa computacional facilita el proceso cuantitativo del desarrollo del ACV; ya sea, de un producto, o de un servicio. Así mismo, contiene una gran variedad de base de datos; tales como, Ecolnvet v3, *Agrifootprint database* y ELCD.

En la presente investigación es utilizada la base de datos de Ecolnvet v3.4, la cual contiene una gran variedad de procesos modelados relacionados con los materiales de construcción, reciclaje, electricidad, metales y otros relacionado a los sectores económicos de un país (Ecolnvet, 2013).

Así también, es necesario señalar que Ecolnvet v3.4 contiene la matriz de generación eléctrica peruana (Moreno et al, 2017), la cual es importante para medir el consumo de energía eléctrica de la maquinaria involucrada en la producción del adoquín.

Con respecto al procedimiento del uso del Software SimaPro 8.05, en el presente estudio, se encuentra sintetizado en cuatro puntos. El primer punto es la creación de procesos, el cual se realiza con la información previamente recolectada en el ICV; cada proceso unitario se modela con la información de la base de datos en la cual se incluyen entradas y salidas de materia y energía, buscándose generar un árbol de procesos que muestre a diferentes escalas los procesos involucrados en el sistema del producto.

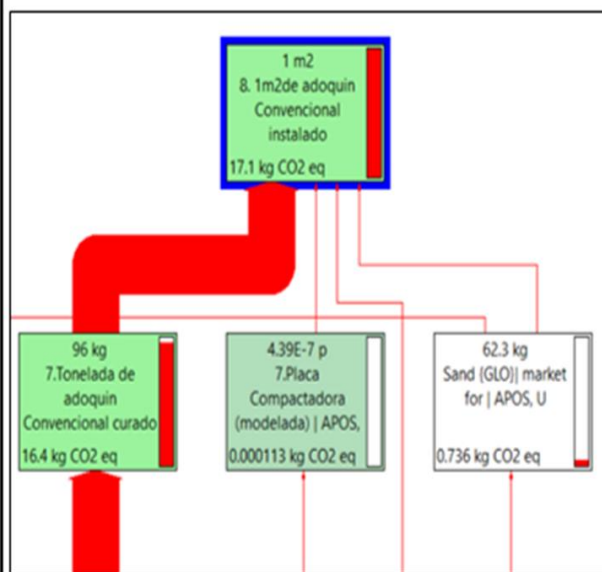
El segundo punto es la creación de montajes, los cuales modelan las fases del ciclo de vida del producto; como la presente investigación es de “cuna a puerta”, solo se modela la etapa de Pre-uso para ambos adoquines.

El tercer punto es el análisis de impactos ambientales o la EICV; para ello, el software Simapro 8.05 contiene la función de “Analizar”, en ella, se especifica el proceso que será analizado y la metodología seleccionada, la cual comprende la categoría de impacto a ser evaluada.

El último punto es la comparación de impactos ambientales; para ello, el software Simapro 8.05 contiene la función de “Comparar”, en la cual se aprecia la diferencia cuantitativa en los procesos y/o etapas de los adoquines para las categorías de impacto seleccionadas. Cabe agregar que, la comparación se puede hacer de manera manual; por lo tanto, el uso de dicha función es opcional.

La figura 3.8 muestra el procedimiento, realizado dentro del Simapro8.05, resumido en los cuatro puntos mencionados.

1. Creación de procesos para 1m2 de superficie pavimentado con adoquin



2.Montaje del ciclo de vida del adoquín (Cuna a puerta)

Archivo Editar Calcular Herramientas Ventana Ayuda

Entrada/salida Parámetros

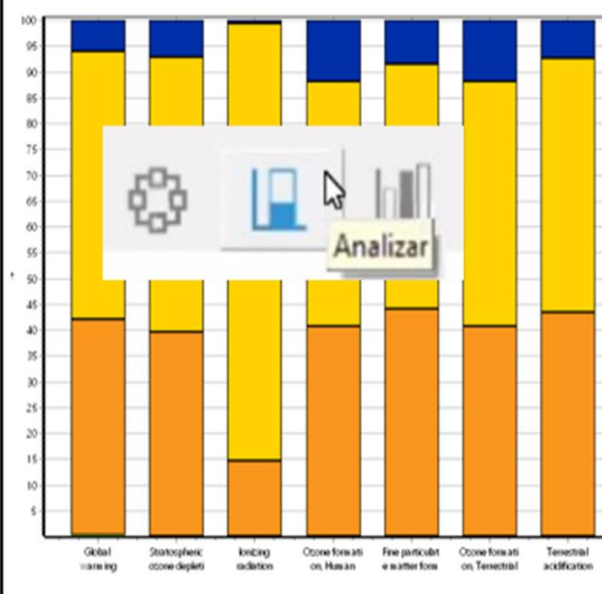
| Nombre | Estado | Co |
|---|--------|----|
| Fase de Pre-uso para el adoquin reciclado | Ning. | |

| Materiales/Ensamblajes | Cantidad | Ud. |
|----------------------------------|----------|-----|
| 9. 1m2de adoquin Ciclo instalado | 1 | m2 |
| (Insertar linea aqui) | | |

| Procesos | Cantidad | Ud. |
|-----------------------|----------|-----|
| (Insertar linea aqui) | | |

Image

3.Análisis de impactos ambientales con SimaPro 8.5 y EcoInvent 3.4



4.Comparación de Impactos ambientales con SimaPro 8.5

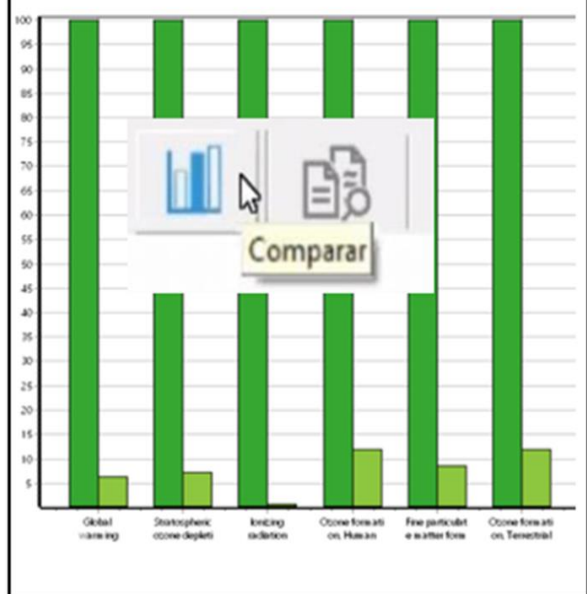


Figura 3.8: Procedimiento para el uso del software Simapro 8.05

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

La presente investigación se enfoca en fomentar nuevas propuestas de materiales de construcción; con la finalidad, de que se pueda instaurar y desarrollar una construcción sostenible en el Perú. Por ello, el objetivo del presente estudio es comparar el impacto ambiental generado por dos tipos de adoquines, de Tipo I o de uso peatonal; para así, poder establecer cuál de ellos genera un menor impacto ambiental.

Por un lado, se encuentra el adoquín convencional o de concreto, utilizado comúnmente en los proyectos viales; la elaboración de este adoquín comprende el uso de agregados naturales provenientes de la cantera del río Huallaga, ubicada en la región de Huánuco.

Por otro lado, el adoquín reciclado, aprovecha el reciclaje los materiales desechados de las construcciones y demoliciones, para su fabricación, los cuales son obtenidos y clasificados en el vertedero ubicado en Cieneguilla, en la región de Lima. Cabe agregar que; tanto, la cantera del río Huallaga; como, el vertedero de Cieneguilla, fueron elegidos debido a la accesibilidad de información necesaria para el desarrollo del proyecto.

4.1 ALCANCES DEL PROYECTO

El presente proyecto, fundamenta la definición del alcance, en los requerimientos establecidos por la norma ISO14040; por consiguiente, en este capítulo se define los límites del sistema, la unidad funcional y las limitaciones del proyecto; de manera que, se cumpla con el objetivo del estudio.

4.1.1 Límites de los sistemas en estudio

Los límites o fronteras del sistema se encargan de definir los procesos unitarios y el nivel de detalle con el cual se analiza el producto (PELCAN, 2018). Por ello, de manera previa, es de suma importancia mencionar las fases del ciclo de vida del adoquín; con la finalidad, de poder identificar las fases que estarán involucradas en el estudio; asimismo, las etapas que no serán tomadas en cuenta para el desarrollo de la investigación.

De este modo, los procesos principales del adoquín se encuentran agrupados en las siguientes fases:

- ✓ Pre-uso: La presente etapa abarca la obtención de materiales, la producción del adoquín en planta y todo el proceso de construcción del adoquín in-situ; es decir, la instalación de dicho material. Por ello, dicha etapa engloba los procesos de obtención, manufactura, construcción e instalación.
- ✓ Uso: Esta etapa comprende el desgaste del adoquín por el flujo peatonal y el mantenimiento del mismo
- ✓ Fin de vida: Esta etapa comprende la demolición total del adoquín instalado y su disposición final hacia los vertederos.

El estudio se enfoca en comparar el impacto ambiental de ambos adoquines en la fase de Pre-uso; debido a que, se encontraron diferencias en los procesos involucrados en esta etapa.

En primer lugar, en el proceso de obtención de materiales, la diferencia radica en que el adoquín convencional extrae los agregados de las canteras de los ríos; mientras que, el adoquín reciclado extrae y clasifica los desechos provenientes de los vertederos.

En segundo lugar, en el proceso de producción, la diferencia entre ambos adoquines se produce en la dosificación; debido a que, el adoquín reciclado utiliza aditivos industriales para lograr la resistencia requerida por la norma, por ende, el consumo de cemento es menor; en contraste, con el adoquín convencional, el cual no hace uso de dichos aditivos.

En tercer lugar, en el proceso de instalación, la diferencia se origina en la cama de arena; debido a que, el adoquín reciclado no utiliza la arena proveniente de las canteras de los ríos, como el adoquín convencional; sino que utiliza como arena los agregados reciclados de la construcción y demolición.

Las fases de uso y disposición final no fueron consideradas en el proyecto, a diferencia de la fase de pre-uso; debido a que, se considera que el flujo de personas que produce el desgaste en los adoquines es similar; además, se toma en consideración que la maquinaria para el mantenimiento y demolición de los

adoquines instalados consumen la misma energía. En consecuencia, estas etapas no son tomadas en cuenta; dado que, la diferencia cuantitativa en estas fases es relativamente nula.

Con lo expuesto, los límites de la investigación están comprendidos desde la obtención de materiales, hasta la instalación del adoquín (Pre-uso); por este motivo, el estudio también es denominado de cuna a puerta o “*cradle to gate*”.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran los límites para ambos adoquines, en los cuales se detallan los procesos involucrados en la investigación.

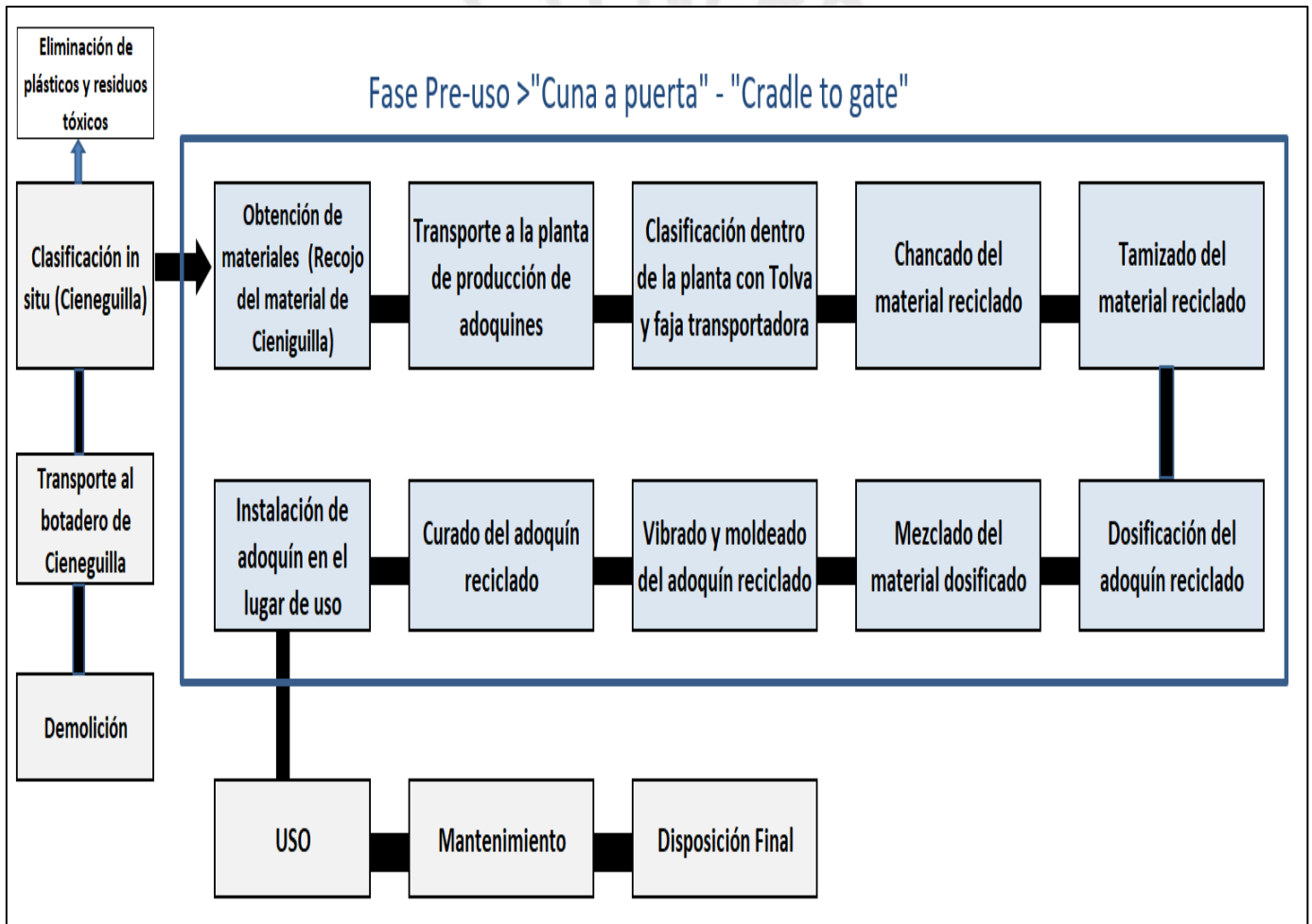


Figura 4.1: Procesos involucrados en el adoquín reciclado.

Fuente: Elaboración propia

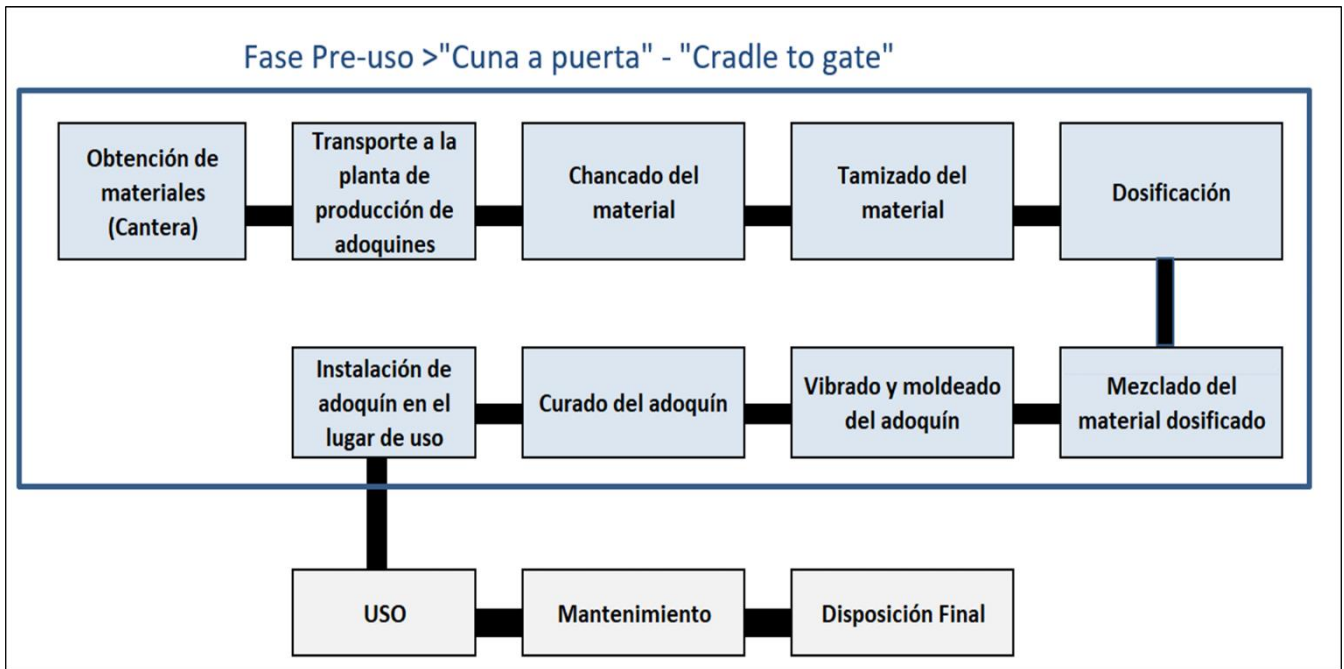


Figura 4.2: Procesos involucrados en el adoquín convencional.

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, tras limitar los procesos involucrados, es necesario detallar las entradas, salidas y la unidad funcional; de tal forma que, se entienda a cabalidad el sistema a ser estudiado.

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los sistemas de los adoquines a ser evaluados.

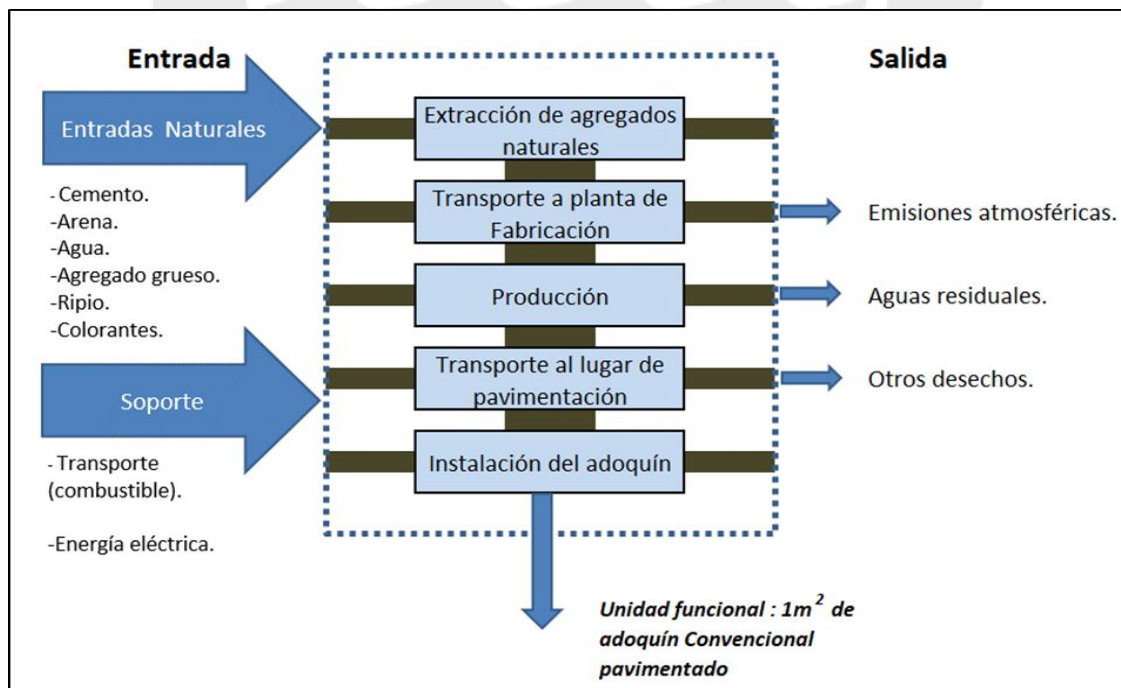


Figura 4.3: Sistema del adoquín convencional. Fuente: Elaboración propia

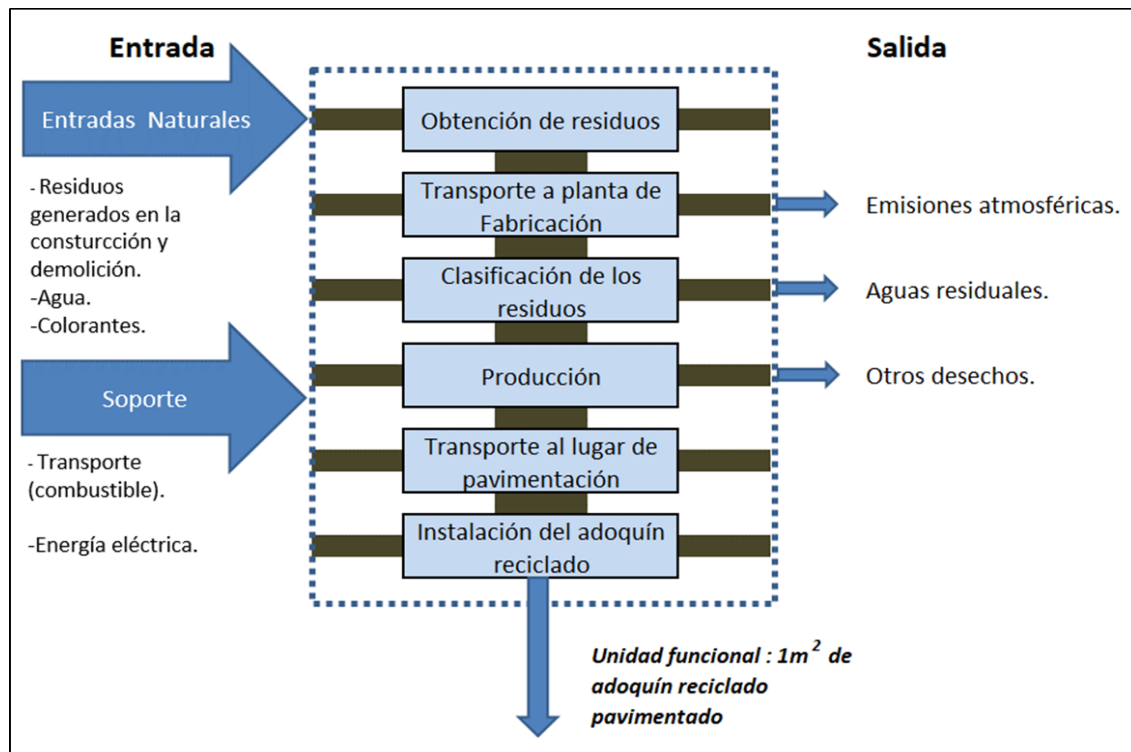


Figura 4.4: Sistema del adoquín reciclado. Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Definición de la unidad funcional

La función del proyecto es pavimentar el terreno urbano, el cual es destinado al flujo de transeúntes. Por este motivo, la unidad funcional del sistema es un metro cuadrado (1m²) de superficie, pavimentada con adoquines.

Es de suma importancia precisar que, el estudio considera dentro del metro cuadrado pavimentado, los bloques de adoquines y la cama de arena donde estos últimos se asientan. Asimismo, el adoquín convencional utiliza arena natural para la construcción de dicha cama de arena, mientras que, el adoquín reciclado emplea agregados reciclados.

Adicionalmente, en la presente investigación, la base, sub-base y subrasante no fueron consideradas; debido a que, en los procesos constructivos de ambos adoquines, se utilizan los mismos materiales y equipos para la compactación de las capas de suelo.

La figura 4.5 muestra la unidad funcional del sistema; así como también, las capas del terreno.

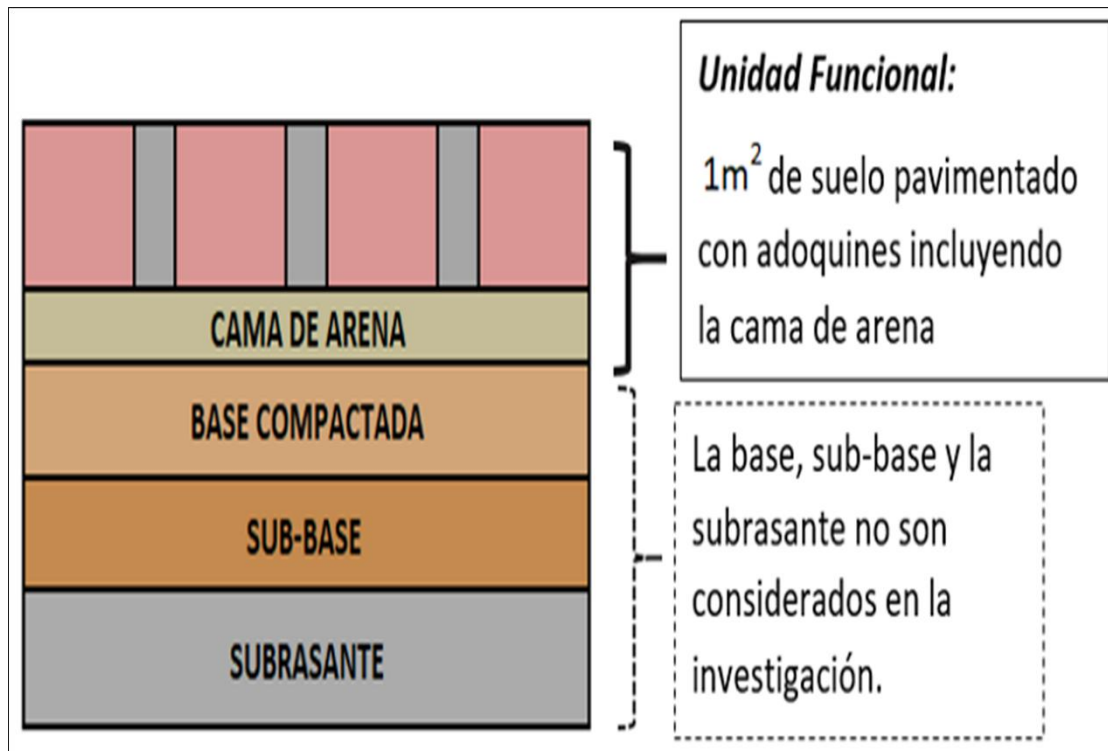


Figura 4.5: Unidad funcional del sistema. Fuente: Elaboración Propia

4.2 RECOLECCIÓN DE DATOS PARA EL ICV

Los datos recolectados en la investigación se realizaron mediante una recopilación iterativa, teniendo como fundamento la norma ISO14040; de tal forma que, sean comprendidos a cabalidad los sistemas de ambos adoquines. Así también, el presente estudio verifica los requerimientos establecidos por la NTP 399.611, para los adoquines peatonales tipo I; esta norma técnica peruana establece las propiedades físicas y químicas, con las cuales deben contar los adoquines del proyecto; así mismo, detalla las dimensiones apropiadas de los adoquines en estudio, las cuales son de 20 cm. de largo, 10 cm. de ancho y 4 cm. de alto.

La información recolectada, para el adoquín reciclado, fue provista por una empresa ubicada en Cieneguilla-Lima, la cual se encarga de transformar los desechos provenientes de la construcción y demolición en productos de construcción como adoquines y ladrillos. Por ello, para obtener los datos del adoquín reciclado de la empresa, se realizaron diagramas de flujo antes de la

visita a la planta (Anexo A, Anexo B); de modo que, se tenga un conocimiento previo de los requerimientos y limitaciones para el desarrollo del ICV. Posteriormente, durante la visita a la planta de producción de adoquines de dicha empresa, se identificó la maquinaria involucrada en la fabricación del adoquín y la dosificación certificada con la que cuenta el adoquín reciclado.

Es necesario señalar que, la investigación considera que la maquinaria a ser utilizada, para la fabricación del adoquín convencional, es la misma utilizada para la elaboración del adoquín reciclado; de manera que, ambos adoquines tengan una producción industrial y no artesanal. Sin embargo, en la investigación se realizó el diseño de mezcla del adoquín de concreto con datos de la cantera del río Huallaga, ubicada en la región de Huánuco; debido a, la accesibilidad a dicho lugar y a la información del estudio de suelo de dicha cantera; además que, se comprobó y certificó dicha dosificación según los requerimientos estipulados por la NTP 399.611.

Seguidamente, tras ser obtenidos los datos de obtención y producción en la planta de fabricación, la investigación desarrolla la parte cuantitativa del ICV; para ello, se realiza una revisión de las fórmulas que se encuentran involucradas en los procesos unitarios del ICV.

La figura 4.6 muestra la secuencia de recolección de datos, realizada en la investigación.

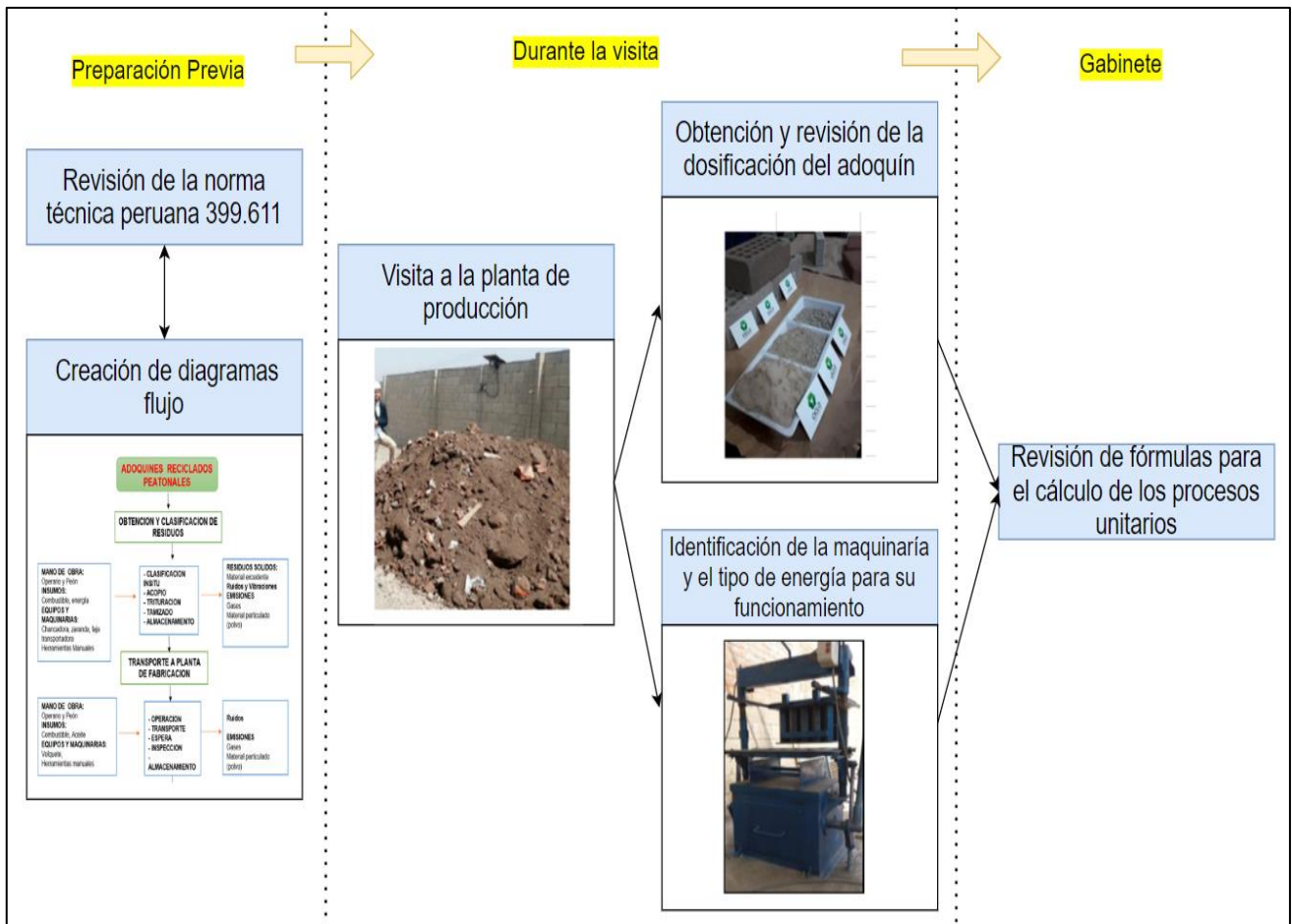


Figura 4.6: Secuencia de recolección de datos. Fuente: Elaboración propia

El punto de partida de la recolección de datos, en la investigación, estuvo constituido por la revisión de la Norma Técnica Peruana 399.611; dado que, en ella se detallan los requerimientos mínimos para el adoquín peatonal tipo I. Uno de los requisitos fundamentales que dicha norma establece, es la resistencia a la compresión; por ello, para el caso del adoquín convencional, la tabla 4.1 muestra los datos, de los agregados naturales de la cantera, los cuales son importantes para la dosificación del concreto y para cuantificar el impacto ambiental, producido por dichos agregados.

Tabla 4.1: Información de la cantera del río Huallaga ubicado en la localidad de Chullqui- Huánuco

| Cantera fluvial del río Huallaga | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|--------|------------------------|
| Constitución granulométrica | Mayores de 3" | Gravas | Arenas y finos |
| | | 40% | 40% |
| Propiedades de los agregados | Agregado grueso (Grava chancada) | | Agregado fino (Arena) |
| Tamaño máximo nominal | 1/2" | | - |
| Modulo de fineza | - | | 2.75 |
| Peso unitario suelto | 1943 kg/m ³ | | 1620 kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 2104 kg/m ³ | | 1660 kg/m ³ |
| Peso específico del agregado | 2.63 g/cm ³ | | 2.66 g/cm ³ |
| % de Absorción | 1.30% | | 2.65% |
| % de Humedad | 4.10% | | 7.50% |

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, la tabla 4.2 muestra el diseño de mezcla del concreto, para la fabricación del adoquín convencional, en el cual se detalla la relación entre componentes del concreto; la relación de agua y cemento; y la distribución de los componentes para la producción de una tonelada de mezcla. Así también, dicha tabla presenta el diseño de mezcla para la producción del adoquín reciclado, el cual fue proporcionado por la empresa encargada de la producción del adoquín reciclado, durante la visita a la planta de producción.

Tabla 4.2: Diseño de mezcla para el adoquín convencional y reciclado

| DISEÑO DE MEZCLA PARA EL ADOQUÍN CONVECIONAL | | | | | |
|--|---------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| | Cemento | Agregado fino | Agregado grueso | Agua | Relación agua/cemento |
| Relación entre componentes | 1 | 1.2 | 2.7 | 0.3 | 0.33 |
| Cantidad distribuida en 1 tonelada | 187 kg | 231 kg | 521 kg | 60 kg | 0.33 |
| DISEÑO DE MEZCLA PARA EL ADOQUÍN RECICLADO | | | | | |
| | Cemento | Agregado reciclado | Agua | Relación agua/cemento | |
| Relación entre componentes | 1 | 5.8 | 1 | 1(*) | |
| Cantidad distribuida en 1 tonelada | 128 kg | 744 kg | 128 kg | 1 | |

(*) Se utiliza aditivos para llegar a la resistencia establecida por la NTP 399.611

Fuente: Elaboración propia

Es necesario resaltar, que los datos recolectados, en las visitas realizadas a la planta de producción del adoquín reciclado, optimizaron el desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida de los adoquines; dado que, permitieron la identificación de la maquinaria en la producción del adoquín. Pero, del mismo modo, también se realizaron visitas al vertedero de Cieneguilla y a algunas obras viales urbanas, en las cuales se recopiló información relevante, con lo que se permitió identificar los equipos pertenecientes a la obtención e instalación de los adoquines.

Dicho lo anterior, la investigación detalla a continuación la maquinaria involucrada, en los procesos de la fase de Pre-uso del adoquín; precisando, a su vez, las limitaciones en la composición y en el funcionamiento de las maquinarias.

Maquinaria involucrada en el proceso de obtención de materiales

En esta etapa, la única maquinaria identificada es la retroexcavadora; dado que, para el adoquín reciclado, el presente proceso involucra la recolección de los agregados reciclados de las construcciones y demoliciones; y el acopio de estos

materiales al camión, el cual se encarga del proceso de transporte a la planta de fabricación.

De igual manera, para el adoquín convencional, la extracción de los agregados naturales, provenientes de la cantera del río Huallaga, se realiza con la retroexcavadora. A continuación, se detalla las limitaciones y observaciones que se tuvieron en cuenta en dicha maquinaria.

Retroexcavadora

La limitación para el modelamiento de la Retroexcavadora consiste en que, dentro de su composición, solo es considerado el hierro fundido; pero no, otros materiales como, el caucho de las llantas o el cuero del asiento del conductor.

La información respecto a la cantidad y el tipo de energía utilizada por la retroexcavadora, fue proporcionada por la base de datos de EcoInvent 3.4, en dicha información, la energía producida por el personal que opera esta maquinaria, no es considerada en el estudio de ACV.

A continuación, la tabla 4.3 muestra las especificaciones técnicas de la maquinaria; así como también, las horas de servicio y de producción recolectadas en el campo, las cuales son de mucha utilidad para cuantificar el impacto ambiental, al momento de ser modelado en el programa computacional.

Tabla 4.3: Detalles técnicos de la retroexcavadora

| Retroexcavadora (SimaPro) | |
|---------------------------------------|------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 15 ton (Simapro) |
| Potencia del motor | 192 HP (Diesel) |
| Rendimiento Heterogeneo | 40 m3/hora |
| Producción | 92 ton/hora |
| Tiempo de vida útil | 25 años |
| Horas de servicio | 4 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Capacidad de la bomba: 163 l/min | |
| Material: Compuesto de Hierro fundido | |

Fuente: Elaboración propia

Maquinaria involucrada en el proceso de producción del adoquín

La maquinaria del presente proceso se halla distribuida en distintas áreas de trabajo, situadas al interior de la planta de producción, la cual se encuentra localizada en el distrito de Cieneguilla-Lima.

La primera área de trabajo, se encarga de realizar la clasificación de los agregados reciclados; la maquinaria utilizada para ejecutar dicha actividad, es una Tolva con una cinta transportadora.

La segunda área de trabajo, se encarga de realizar el chancado y tamizado de los agregados; para ello, se utiliza la chancadora primaria y la zaranda vibratoria; de tal modo, que los agregados reciclados cumplan con la dosificación establecida por el diseño de mezcla.

Finalmente, la última área de trabajo se encarga de producir el concreto, mediante la mezcladora tipo trompo; para seguidamente, realizar el vibrado y el moldeo de los bloques de adoquín, mediante la bloquetera tipo rosa cometa.

Mencionado lo anterior, a continuación se muestran las limitaciones y observaciones que se tuvieron, en el presente proceso, respecto a la maquinaria; además cabe añadir, que para el proceso de curado y secado no es usado ningún equipo; ya que, ello es realizado, con la ayuda del personal encargado de dichas funciones.

Tolva con Cinta transportadora

Los materiales que no serán desarrollados en el ICV son el caucho y las fibras de plástico; de esta forma, solo se toma en consideración para el modelamiento, el peso del hierro fundido, comprendido en su composición.

La información respecto a la cantidad y tipo de energía consumida por la tolva, fue obtenida en la visita a la planta de producción. Con ella, se modeló y creó un nuevo proceso para la maquinaria, teniendo en cuenta el consumo de energía eléctrica en el Perú; ya que, la información respecto a dicha maquinaria, no fue desarrollada en la base de datos de EcoInvent 3.4.

A continuación, la tabla 4.4 muestra los datos que son sumamente importantes

para calcular el aporte de la carga ambiental de la Tolva, dentro del software; así como también, los datos técnicos que no forman parte del cálculo de la carga ambiental, pero muestran detalles específicos de la maquinaria. Así mismo, la figura 4.4 muestra una Tolva con cinta transportadora, la cual se encarga de realizar la clasificación de los materiales.

Tabla 4.4: Detalles técnicos de la tolva con cinta transportadora

| Tolva con cinta transportadora para reciclaje | |
|--|--------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.8 ton |
| Potencia del motor | 4.5 HP (eléctrico) |
| Producción | 0.3 ton/Hora |
| Tiempo de vida útil | 10 años |
| Horas de servicio | 8 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Ejes compuesto de Acero | |
| Cinta transportadora de caucho | |
| Accesorios adicionales: Engrasador y Prensa embaladora | |



Figura 4.7: Tolva con cinta transportadora. Fuente: Empresa Bandas Cortés

Chancadora Primaria de Quijada de “6x 10”

Los materiales que se encuentran en el rodillo de la chancadora; tales como, el caucho, los pernos y el aceite industrial, no son considerados en el modelamiento. La razón por la cual la investigación no considera estas piezas, radica en la dificultad de desmontar el equipo en funcionamiento, para analizar el peso de dichos componentes; por ende, solo se considera el peso del hierro fundido, como componente único de la maquinaria.

La información brindada por la empresa, durante la visita, permite cuantificar el consumo de la energía eléctrica de la maquinaria; ya que, con los datos recolectados se crea y modela el proceso del equipo, en el software Simapro.

A continuación la tabla 4.5 presenta los datos utilizados en el software y las características de dicha maquinaria, dentro del mercado peruano; además, la figura 4.8 muestra el modelo de la maquinaria utilizada en planta.

Tabla 4.5: Detalles técnicos de la chancadora primaria

| Chancadora Primaria de Quijada de 6"x 10" | |
|---|-----------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.7 ton |
| Potencia del motor | 7.5 HP (eléctrico) |
| Producción | 0.3 ton/Hora para ¼ " |
| Tiempo de vida útil | 2 años |
| Horas de servicio | 8 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Eje de Acero 1045 | |
| Volantes de fierro fundido | |
| Muelas con rodamientos de rodillos | |
| Carcasa de acero estructural soldado eléctricamente | |
| Accesorios adicionales: bastidor, fajas y polea | |



Figura 4.8: Chancadora primaria. Fuente: Empresa: MP RECICLA S.A.C.

Zaranda Vibratoria Clasificadora

Los materiales que componen las mallas de aceros; así también, los ejes de transmisión que permiten la vibración en la zaranda, no son considerados en la investigación; ya que, solo se toma en cuenta, como parte de la composición para el modelamiento del equipo, el peso de materiales de hierro.

La información recolectada, en la empresa, muestra que el funcionamiento del motor, se da a base de electricidad, de bajo voltaje; así también, en el trabajo de campo realizado, se reunieron datos referentes a la producción, horas de servicio y peso de la maquinaria.

De esta manera, la tabla 4.6 presenta la información utilizada durante la parte cuantitativa del ICV; además, se mencionan los datos técnicos de la maquinaria. La figura 4.9 muestra la figura de una zaranda vibratoria, la cual fue adquirida por la empresa destinada a la producción de adoquines reciclados.

Tabla 4.6: Detalles técnicos de la zaranda vibratoria

| Zaranda Vibratoria Clasificadora | |
|--|-------------------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.2 ton |
| Potencia del motor | 1.5 HP (eléctrico-Trifásico) |
| Producción | 8.8×10^{-2} ton/hora |
| Tiempo de vida útil | 2 años |
| Horas de servicio | 8 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Eje excéntrico de acero boehler 1045 | |
| Mallas de acero y van emperradas a la carcasa | |
| Transmisión mediante fajas | |
| Accesorios: Estructura soporte y cuenta con chutes | |



Figura 4.9: Zaranda vibratoria clasificadora de 500 x 1200.

Fuente: MP RECICLA S.A.C.

Mezcladora de concreto tipo Trompo

Los materiales pertenecientes al motor y a las llantas, no son considerados en el estudio. Contrariamente, el peso del tambor de la mezcladora, así como también, el de los ejes de soporte, al estar compuestos por hierro fundido, sí son considerados en el modelamiento de la maquinaria.

Durante la visita a la planta de producción, se registraron los valores de producción, horas de servicio y potencia del motor, los cuales son importantes para el modelamiento de la maquinaria en el ICV.

La tabla 4.7 presenta los datos recolectados y las especificaciones técnicas del equipo, dentro del mercado peruano. Además, la figura 4.10 muestra la mezcladora tipo trompo, diseñada por la empresa Bauker.

Tabla 4.7: Detalles Técnicos de Mezcladora tipo trompo

| Mezcladora tipo Trompo | |
|------------------------------------|---------------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.5 ton |
| Potencia del motor | 1.1 HP (eléctrico-Bauker) |
| Producción | 0.1 ton/hora |
| Tiempo de vida útil | 3 años |
| Horas de servicio | 8 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Capacidad volumétrica (Tambor): | 220 Litros |
| Velocidad de rotación | 3400 RPM |
| Material | Fierro fundido |
| Medidas | 1.4 x 0.8 x 1.5m |



Figura 4.10: Mezcladora de Concreto. Fuente: empresa Bauker

Bloquetera tipo Rosa Cometa

El material principal que compone la bloquetera rosa cometa es el hierro fundido; de este modo, solo se considera dicho material en el estudio. Por otro lado, los demás materiales que conforman el equipo, no son considerados en la investigación; debido a, la dificultad para desmontar la bloquetera y pesar cada uno de estos materiales, independientemente.

Los datos obtenidos en el estudio de campo, están referidos a las horas de servicio, la potencia del motor eléctrico y la producción, por hora, de los bloques de adoquines; cabe añadir que, para el caso de la producción, se considera el tiempo necesario para producir el peso total de 1 tonelada, de las unidades o bloques de adoquín producidos.

La tabla 4.8 muestra el valor de los datos mencionados, los cuales son importantes al momento de realizar los cálculos, en los procesos unitarios de vibrado y moldeado; así también, se señalan algunas especificaciones técnicas, dentro del mercado peruano. La figura 4.11 muestra la figura de la bloquetera tipo rosa cometa, la cual fue provista por la empresa dedicada al rubro de reciclaje.

Tabla 4.8: Detalles Técnicos de la bloquera tipo rosa cometa

| Bloquera tipo rosa cometa | |
|--|-------------------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 1.5 ton |
| Potencia del motor | 10.5 HP (eléctrico-Trifásico) |
| Producción | 0.2 ton/hora |
| Tiempo de vida útil | 5 años |
| Horas de servicio | 8 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Motor Delcrosa/Voges para la vibrocompactación | |
| Sistema hidráulico para repontenciar el motor | |
| Material : Hierro fundido | |
| Accesorios adicionales: molde para adoquines 4x10x20 | |



Figura 4.11: Bloquera tipo rosa cometa. Fuente: MP RECICLA S.A.C.

Maquinaria involucrada en el proceso de instalación del adoquín

La maquinaria involucrada en esta etapa cumple 2 funciones específicas, compactar y apisonar las capas, sobre las cuales, serán colocados los adoquines. El equipo encargado de compactar estas capas, es una vibro compactadora tipo rana de motor eléctrico.

A medida que se va compactando la última capa, se realiza paralelamente, el apisonamiento de estas capas; de tal forma que, el relieve sea uniforme, utilizándose, para ello, una placa compactadora de motor diésel.

A continuación, se muestran los datos técnicos y las limitaciones de los equipos que son parte de la instalación, los cuales son necesarios para el cálculo del impacto ambiental.

Vibro compactadora tipo Rana

La unidad vibradora, al igual que el soporte de la maquinaria, están compuestas por hierro fundido; la investigación se limita a modelar el equipo, tomando en cuenta, solo este componente; por ende, los otros materiales que integran el motor, el radiador, los filtros y los ventiladores, no son considerados en el estudio.

Los datos recolectados para esta maquinaria fueron obtenidos en las obras

viales urbanas, en las cuales, el terreno es pavimento con adoquines peatonales convencionales; entre los datos obtenidos para la creación del proceso de la vibro compactadora, se encuentran los datos referidos a la potencia del motor, a la producción y a las horas de servicio, por día, en las cuales se utiliza el producto.

La tabla 4.9 presenta los datos de campo mencionados y los datos técnicos que ofrece el mercado para el presente producto. Así también, la figura 4.12 muestra la vibro compactadora tipo rana utilizada en la obra.

Tabla 4.9: Detalles Técnicos Vibro compactadora

| Vibrocompactadora tipo Rana | |
|------------------------------------|--------------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.1 ton |
| Potencia del motor | 9 HP (eléctrico) |
| Producción | 550 m ² /hora |
| Tiempo de vida útil | 3 años |
| Horas de servicio | 6 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Velocidad de avance | 30-35 m/min |
| Frecuencia de vibración | 5400/min |
| Efecto de compactación | 4.2-6.2 ton |
| Material | Fierro fundido |
| Área de la plancha | 50x65cm. |



Figura 4.12: Vibro compactadora tipo rana Fuente: Empresa EQUIPMASER

Placa compactadora C120T-KM170

La placa compactadora tiene las mismas limitaciones que la maquinaria anteriormente mencionada; de este modo, solo son considerados en el modelamiento, el peso de la placa y el de los soportes del equipo, los cuales están compuestos por hierro fundido.

El motor de la placa compactadora funciona a base de diésel, a diferencia de los equipos de producción, los cuales funcionan a base de energía eléctrica. Al igual que la Vibro compactadora tipo rana, los datos de campo de este equipo, se

obtuvieron mediante la visita a las obras viales, vinculadas a la colocación de adoquines; los datos obtenidos son los referentes a la potencia del motor, a la producción del equipo y a las horas de servicio por día.

La tabla 4.10 presenta los datos mencionados, los cuales son importantes para el desarrollo del ICV; así mismo, se muestran los datos técnicos del equipo. Así también, la figura 4.13 muestra la Placa compactadora usada en obra.

Tabla 4.10: Detalles Técnicos Placa Compactadora 120T

| Placa compactadora C120T-KM170 | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Datos a utilizar en el Simapro | |
| Peso | 0.1 ton |
| Potencia del motor | 4.2 HP (Diesel) |
| Producción | 540 m ² /hora |
| Tiempo de vida útil | 5 años |
| Horas de servicio | 6 horas/día |
| Datos adicionales de la maquinaria | |
| Motor Diésel, Kama KM170 | |
| Tamaño de placa 35x45cm | |
| Desplazamiento unidireccional | |
| Material : Fierro fundido | |



Figura 4.13: Placa Compactadora 120T. Fuente: ENERMAX

Adicionalmente, en este proceso se utiliza una cortadora de adoquín, la cual se encarga de esculpir los bloques; de modo que, puedan calzar dentro del espacio asignado en el pavimento peatonal. Las características principales de este equipo son las siguientes, tiene un peso de 52 kg. y sus dimensiones son de 810x240x700 mm.

Pese a su utilidad mencionada, el presente modelo de cortadora no es considerado dentro del inventario; debido a que, no cuenta con un motor; así mismo, su carga ambiental, considerándose solo el peso del equipo, no genera un impacto ambiental significativo en el ACV del adoquín.

La figura 4.14 muestra la cortadora de adoquín manual diseñada utilizada durante la instalación del adoquín.



Figura 4.14: Cortadora manual para adoquines. Fuente: TERCAST

Tras haberse detallado la información de la maquinaria involucrada en el ACV del adoquín, lo siguiente es calcular su respectivo aporte, en los procesos unitarios del ICV.

El impacto ambiental producido por la maquinaria proviene de la energía total y del peso involucrado en el proceso unitario. La energía total de la maquinaria se calcula mediante la suma de la energía consumida por su funcionamiento ($E_{funcionamiento}$) y la energía contenida ($E_{contenida}$), la cual se define como la energía utilizada en la fabricación del producto (Pearce et al, 2007).

Adicionalmente, en tanto, la maquinaria del ACV fue modelada teniendo en cuenta solo el peso del hierro fundido, el valor de la energía contenida, para este material, es de 20.2 MJ/kg; el cual, fue obtenido utilizando la base de datos de EcoInvent 3.4 y mediante el uso de la metodología de impacto CED v1.1.

A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas para la cuantificación del aporte de la maquinaria, en los procesos unitarios:

$t_{funcionamiento}$ = tiempo de funcionamiento del equipo en el proceso unitario

$$E_{funcionamiento} = Potencia\ del\ motor * t_{funcionamiento} \dots\dots\dots(eq1)$$

$$E_{contenida} = \left(20,2 \frac{MJ}{kg}\right) * (Peso\ del\ equipo) * \left(\frac{t_{funcionamiento}}{tiempo\ total\ de\ servicio}\right) \dots\dots\dots (eq2)$$

$$E_{Total \text{ para la maquinaria}} = E_{contenida} + E_{funcionamiento} \dots\dots\dots (eq3)$$

Unidades : tiempo (horas), peso (kg), potencia $\left(\frac{MJ}{h}\right)$, Energía (MJ)

Es importante esclarecer, que el estudio no considera el impacto ambiental generado por la mano de obra operante de las maquinarias. En consecuencia, no son considerados, en el ACV, los equipos de protección personal o EPP; tales como, botas, cascos, lentes, etc. Tampoco se consideran los equipos de protección de la construcción o EPC; como por ejemplo, mallas de seguridad, plataformas, líneas de vida entre otros.

Ahora, al concluir con el proceso de recolección, el cual se resume en la identificación de la norma para adoquines, las fuentes de obtención de materiales, el diseño de mezcla, las limitaciones de la maquinaria y la secuencia de fabricación del adoquín; lo que prosigue, es detallar los procesos unitarios del proyecto, los cuales son de utilidad en el cálculo del impacto ambiental, del adoquín.

4.3 PROCESOS UNITARIOS DEL ICV DEL PROYECTO

El presente inciso detalla las limitaciones y acotaciones que se tuvieron en los procesos unitarios de la investigación; es necesario señalar que, estos procesos están vinculados con los datos recolectados y detallados señalados en el inciso anterior; de manera que, se cumpla con los lineamientos establecidos por la norma ISO 14040.

Estos procesos unitarios se encuentran relacionados de manera secuencial; es decir, el producto final de un proceso es; a su vez, la entrada de materia del siguiente proceso. De este modo, la tabla 4.11 presenta los procesos unitarios para los adoquines; así como también, el producto final de cada proceso.

Tabla 4.11: Procesos Unitarios con sus respectivos productos finales pertenecientes al ACV de los adoquines de la investigación

| Procesos Unitarios | Producto final del Proceso Unitario del adoquín | |
|-------------------------------|--|---|
| | Adoquín reciclado | Adoquín Convencional |
| 1 Obtención de Materiales | 1 Tonelada de desmonte para agregados reciclados | 1 Tonelada de arena y grava extraída de cantera natural |
| 2 Clasificación de Materiales | 1 Tonelada de agregado reciclado clasificado | ----- |
| 3 Trituración de materiales | 1 Tonelada de agregado reciclado triturado | 1 Tonelada de agregado natural triturado |
| 4 Tamizado de Materiales | 1 Tonelada de agregado reciclado tamizado | 1 Tonelada de agregado natural tamizado |
| 5 Dosificación de Materiales | 1 Tonelada de mezcla de adoquín reciclado dosificado | 1 Tonelada de mezcla adoquín Convencional dosificado |
| 6 Amasado de Materiales | 1 Tonelada de mezcla amasada de adoquín reciclado | 1 Tonelada de mezcla adoquín convencional amasado |
| 7 Vibrado y Moldeado | 1 Tonelada de mezcla reciclado vibrado y moldeado | 1 Tonelada de mezcla Convencional vibrado y moldeado |
| 8 Curado de Materiales | 1 Tonelada de adoquín reciclado curado | 1 Tonelada de adoquín Convencional curado |
| 9. Instalación del adoquín | 1 m2 de adoquín reciclado instalado | 1 m2 de Adoquín convencional instalado |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de obtención de materiales

Este proceso unitario se encarga de analizar las entradas y salidas, involucradas en la adquisición de materiales de los adoquines en observación; de manera que, se pueda cuantificar los impactos ambientales relacionados al producto obtenido.

El producto para el caso del adoquín reciclado es 1 tonelada de desmonte, destinado a ser utilizado como agregado y para el adoquín convencional, es 1 tonelada de arena y grava, provenientes de la extracción de las canteras del río.

Estos productos obtenidos son parte del flujo de materia de las salidas del proceso. Para su obtención, se utiliza como soporte, una retroexcavadora encargada de extraer los materiales de la fuente y de acopiarlos, para luego poder transportarlos a la planta de producción. Este soporte es considerado como parte del flujo de entrada del procedimiento; así mismo, se añade como ingreso de energía, al combustible consumido por la maquinaria.

Respecto al flujo materia que ingresa en el proceso, se encuentran los agregados, los cuales son extraídos de la fuente por la retroexcavadora. Por un

lado, para el caso del adoquín reciclado, la entrada de materia es 1 tonelada de desmonte, la cual se obtiene del reciclaje de materiales, provenientes de las construcciones y demoliciones. Sin embargo, el valor de la carga ambiental de esta tonelada, es considerado nulo en la investigación; debido a que al utilizar el material proveniente del reciclaje, como materia prima, genera un beneficio al medio ambiente, lo que se traduce en un impacto positivo. Asimismo, por definición se establece que el valor de las cargas ambientales, provenientes de los flujos de materia o energía de un proceso unitario, están relacionados a los efectos que causan impactos negativos en el ambiente (Moya et al, 2010).

Por otro lado, para el caso del adoquín convencional, el flujo de materia está conformado por arena y grava en kilogramos y añadidas al procesos de manera independiente; debido a que, la extracción de cada uno de estos materiales genera por sí misma, diferentes cargas ambientales que son cuantificadas en la base de Ecolnvent. Empero, las cantidades de ambos agregados deben sumar 1 tonelada; ya que, se debe tener un balance de masas entre las entradas y salidas de los procesos unitarios.

Adicionalmente, cabe señalar que los flujos de materia y energía que son complementados en la base de datos de Ecolnvent 3.4, utilizan el set de información de carácter *“allocation”* y no el *“consequential”*. Según Ekvall (2019), la diferencia radica en que el set *“allocation”* da una estimación de que parte del impacto ambiental generado pertenece al producto; por otro lado, el set *“consequential”* da una estimación de cómo el uso y la producción del producto afectarán al medio ambiente.

La tabla 4.12 presenta las entradas y salidas del proceso unitario de obtención de materiales para los adoquines en estudio, el cual no presenta residuos de energía y materia en sus salidas.

Tabla 4.12: Proceso unitario de obtención de materiales para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario :Obtención de Materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|---|--------------------|---------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Desmante destinado para ser utilizado como agregados reciclados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Retroexcavadora {RoW} Alloc Def, U (sin considerar el diesel) | 3×10^{-7} | pieza |
| Diesel, usado en maquinaria de construcción {GLO} Alloc Def, U | 5.83 | MJ |
| Desmante extraído del vertedero (carga ambiental = 0, nula) | 1 | Toneladas |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario :Obtención de Materiales (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Arena y grava extraída de canteras naturales | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Arena {GLO} Alloc Def, U | 307 | kg |
| Grava chancada {CL} Alloc Def, U | 693 | kg |
| Retroexcavadora {RoW} Alloc Def, U (sin considerar el diesel) | 3×10^{-7} | pieza |
| Diesel, usado en maquinaria de construcción {GLO} Alloc Def, U | 5.83 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene salidas a la tecnósfera | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de clasificación de materiales

Este proceso unitario pertenece exclusivamente al ACV del adoquín reciclado, en este se clasifica el desmante, al interior de la planta de fabricación; de modo que, los agregados reciclados puedan ingresar fácilmente a la máquina trituradora; caso contrario, dichos agregados son chancados manualmente y vueltos a clasificar, con tal, de que no se obtengan residuos.

Cabe acotar que, en el presente estudio, el desmante clasificado en planta fue segregado previamente a su extracción, en el lugar de demolición y en el vertedero de Cieneguilla; por ello, no se generan residuos de plásticos o de cualquier otro material dañino; además que, dicha segregación no es considerada como parte del ciclo de vida del adoquín.

El producto obtenido, de este proceso, es 1 tonelada de agregado reciclado clasificado. Para poder obtener dicho producto, el proceso utiliza como soporte una tolva con faja transportadora, la cual a su vez, utiliza un motor de energía eléctrica; ambos elementos son parte del flujo de entrada.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, se tiene como entrada 1 tonelada de desmonte para los agregados reciclados, el cual es el producto final del anterior proceso (obtención de materiales); en tanto, es importante mantener la conservación de materia entre las salidas y entradas de los procesos unitarios.

La tabla 4.13 presenta las entradas y salidas del proceso; en los procesos unitarios del estudio, se muestran los datos de la maquinaria y la energía consumida, de forma separada; de manera que, se visualice el modelamiento del consumo de energía eléctrica (bajo voltaje), teniendo en cuenta la data del Perú, la cual fue extraída de la base de datos de Ecolnvent 3.4.

Tabla 4.13: Proceso unitario de clasificación de materiales para el adoquín reciclado

| Proceso Unitario : Clasificación de materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|--|----------------------|-----------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Agregados reciclados clasificados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| | Cantidad | Unidad |
| Desmonte destinado para ser utilizado como agregados reciclados | 1 | Toneladas |
| Tolva con faja transportadora (modelada) Alloc Def, U | 1.4×10^{-4} | pieza |
| Electricidad, bajo voltaje {PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 50 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| | Cantidad | Unidad |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de trituración del material

Este proceso unitario es considerado como un procedimiento iterativo; en tanto, en él se efectúa una trituración continua de los materiales empleados para la fabricación de los adoquines. Dicha acción cesa en el momento que el producto obtenido satisface los requisitos granulométricos establecidos en el diseño de mezcla; es decir, este proceso se encarga de reducir el tamaño de los agregados, evitando generar residuos en la salida del proceso.

El producto obtenido, para el adoquín reciclado, es 1 tonelada de agregados triturados provenientes del reciclaje y para el adoquín convencional es 1 tonelada de agregados triturados, provenientes de la cantera.

El soporte, para obtener dichos productos, es una chancadora primaria con un motor eléctrico de bajo voltaje, el cual es considerado dentro del flujo que ingresa al proceso.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, para el adoquín reciclado es 1 tonelada de agregados reciclados clasificados y para el adoquín convencional es 1 tonelada de arena y grava extraída de las canteras del río.

La tabla 4.14 presenta las entradas y salidas del proceso de trituración de materiales, para los adoquines en estudio.

Tabla 4.14: Proceso unitario de trituración del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Trituración de materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|--|----------------------|-----------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Agregados reciclados triturados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Agregados reciclados clasificados | 1 | Toneladas |
| chancadora primaria (modelada) Alloc Def, U | 6.9×10^{-4} | pieza |
| Electricidad, bajo voltaje {PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 90 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Trituración de materiales (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Agregados naturales triturados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Arena y grava extraída de canteras naturales | 1 | Toneladas |
| chancadora primaria(modelada) Alloc Def, U | 6.9×10^{-4} | pieza |
| Electricidad, bajo voltaje {PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 90 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de tamizado del material

Este proceso unitario se encarga de filtrar y separar los agregados, de acuerdo al tamaño establecido por las mallas ASTM; de manera que, se lleve un control de la dosificación, en planta. Los agregados que exceden al tamaño requerido en el diseño de mezcla, retornan a la chancadora para volver a ser tamizados;

de esta manera, se evitan pérdidas o residuos dentro de las salidas del proceso unitario.

El producto obtenido en el proceso unitario para el adoquín reciclado es 1 tonelada de agregados provenientes del reciclaje tamizado y para el adoquín convencional es 1 tonelada de agregados naturales tamizados.

Para la obtención de dichos productos se utiliza como soporte una zaranda vibratoria, la cual consume energía eléctrica de bajo voltaje; de modo que, tanto la maquinaria, como la energía consumida son partes del flujo de entrada.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, para el adoquín reciclado es 1 tonelada de agregados reciclados triturados y para el adoquín convencional es 1 tonelada de agregados naturales triturados.

La tabla 4.15 presenta las entradas y salidas involucradas en el proceso unitario de tamizado de materiales, de los adoquines en estudio.

Tabla 4.15: Proceso unitario de tamizado del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Tamizado de Materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|---|--------------------|---------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Agregados reciclados tamizados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | Cantidad | Unidad |
| Agregados reciclados triturados | 1 | Toneladas |
| Zaranda Vibratoria (modelada) Alloc Def, U | 2×10^{-3} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 54 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | Cantidad | Unidad |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Tamizado de Materiales (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Agregados naturales tamizados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | Cantidad | Unidad |
| Agregados naturales triturados | 1 | Toneladas |
| Zaranda Vibratoria (modelada) Alloc Def, U | 2×10^{-3} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 54 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | Cantidad | Unidad |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de dosificación del material

Este proceso se encarga de proporcionar y dosificar las cantidades de cemento, agregados naturales o reciclados, agua potable y aditivos; con el propósito, de que se cumpla con el diseño de mezcla de los adoquines, establecido en los requisitos de la NTP 399.611.

El producto obtenido para el adoquín reciclado es 1 tonelada de mezcla dosificada, con agregados provenientes del reciclaje y para el adoquín convencional es 1 tonelada de mezcla dosificada, con agregados naturales.

Para la obtención de dichos productos no es utilizada una maquinaria como soporte; ya que, en dicho proceso, el personal encargado solo selecciona y acopia los materiales antes de que estos sean mezclados.

El flujo de materia que ingresa al proceso depende del diseño de mezcla obtenido en la recolección de datos. Por un lado, para el adoquín reciclado, se ingresa al proceso 744 kg. de agregados reciclados tamizados, 128 kg. de agua, 128 kg. de cemento y aditivos, de los cuales no se especifica la cantidad de ingreso; debido a que, es información exclusiva de la empresa; por ende, no es considerado en la investigación.

Por otro lado, para el caso del adoquín convencional, el flujo de materia que ingresa está compuesto por 752 kg. de agregados naturales tamizados (arena y grava) ,187 kg. de cemento y 61 kg. de agua potable. De esta manera, los componentes pertenecientes al flujo de materia, tanto en el adoquín reciclado, como también en el adoquín convencional, suman 1 tonelada, cumpliéndose así la conservación de masa en el proceso.

Las cantidades de los componentes de la mezcla son comprobadas en la planta de producción, ubicada en Cieneguilla; sin embargo, durante el modelamiento del proceso, para el cemento y el agua potable dentro de la base de datos de Ecolnvent, se utilizó información perteneciente al país de Chile por dos razones; debido a que, no existe registro previo para el Perú y dado que, el proceso de tratamiento y producción de dichos materiales se asemejan a la realidad peruana.

La tabla 4.16 presenta las entradas y salidas del proceso unitario de dosificación.

Tabla 4.16: Proceso unitario de dosificación del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Dosificación de materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|---|-----------------|---------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Mezcla dosificada con agregados provenientes del reciclaje | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Agregados reciclados tamizados | 744 | kg |
| Agua Potable{CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 128 | kg |
| Cemento Portland {CL} production Alloc Def, U | 128 | kg |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Dosificación de materiales (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Mezcla dosificada con agregados naturales | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Agregados naturales tamizados | 752 | kg |
| Agua Potable{CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 61 | kg |
| Cemento Portland {CL} production Alloc Def, U | 187 | kg |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de amasado de materiales

Este proceso consiste en combinar los materiales dosificados, dentro de la mezcladora tipo trompo; de tal modo que, se genere una masa de concreto moldeable para poder producir los adoquines.

El producto obtenido, tanto para el adoquín reciclado, como para el adoquín convencional, es 1 tonelada de mezcla amasada.

El soporte para la obtención del producto es una mezcladora tipo trompo que consume energía eléctrica de bajo voltaje, la cual se considera dentro del flujo que ingresa al proceso.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, para el adoquín reciclado, es 1 tonelada de mezcla dosificada con agregados provenientes del reciclaje y para el adoquín convencional, es 1 tonelada de mezcla dosificada con agregados naturales.

La tabla 4.17 muestra las entradas y salidas pertenecientes al proceso unitario de amasado de materiales.

Tabla 4.17: Proceso unitario de amasado del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Amasado de materiales (Adoquín Reciclado) | | |
|---|----------------------|---------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Mezcla amasada para la producción de adoquines reciclados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Mezcla dosificada con agregados provenientes del reciclaje | 1 | Toneladas |
| Mezcladora trompo (modelada) Alloc Def, U | 1.2×10^{-3} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 41 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Amasado de materiales (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Mezcla amasada para la producción de adoquines convencionales | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Mezcla dosificada con agregados naturales | 1 | Toneladas |
| Mezcladora trompo (modelada) Alloc Def, U | 1.2×10^{-3} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 41 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de vibrado y moldeado del material

Este proceso consiste en vibrar la mezcla y luego moldearla, de acuerdo a las dimensiones establecidas por la NTP. 399.611, para adoquines peatonales.

El producto obtenido en el proceso, tanto, para el adoquín reciclado, como para el adoquín convencional, es 1 tonelada compuesta de unidades de adoquines vibrados y moldeados, listos para el proceso de curado.

El soporte para obtener dicho producto, es una bloquetera rosa cometa que consume energía eléctrica de bajo voltaje, la cual se considera dentro del flujo que ingresa al proceso.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, tanto para el adoquín reciclado, como para el adoquín convencional, es 1 tonelada de mezcla amasada.

La tabla 4.18 muestra las entradas y salidas del proceso de vibrado y moldeado de los adoquines.

Tabla 4.18: Proceso unitario de vibrado y moldeado del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Curado del material (Adoquín Reciclado) | | |
|--|----------|-----------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín reciclado curados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Unidades de adoquín reciclado vibrados y moldeados | 1 | Toneladas |
| Agua potable {CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 292 | kg |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Agua utilizada para el curado, tratamiento convencional Alloc Def, U | 292 | kg |
| Proceso Unitario : Curado del material (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín convencional curados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Unidades de adoquín convencional vibrados y moldeados | 1 | Toneladas |
| Agua potable {CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 311 | kg |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Agua utilizada para el curado, tratamiento convencional Alloc Def, U | 311 | kg |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario de curado del material

Este proceso consiste en verter agua potable sobre los adoquines, para mantener una temperatura y humedad óptimas; de tal manera que, se logre desarrollar la resistencia y durabilidad establecida por la NTP39.611.

El producto final obtenido en el proceso, tanto para el adoquín reciclado, como para el adoquín convencional, es 1 tonelada compuesta de unidades de adoquines curados, los cuales son secados y seguidamente transportados, para ser instalados. Para la obtención de dichos productos, no es utilizada una maquinaria de soporte; debido a que, el personal de la planta de producción se encarga de realizar dicho proceso de forma manual.

Respecto al flujo de materia que ingresa al proceso, tanto para el adoquín reciclado, como para el convencional, es 1 tonelada compuesta de unidades de

adoquines vibrados y moldeados. Para el adoquín convencional ingresa 311 kg. de agua potable y para el adoquín reciclado, 291 kg. de dicho líquido. La diferencia en la cantidad de agua se debe a que la unidad de adoquín convencional pesa 100 gramos más que el adoquín reciclado, según la información recolectada en la planta de producción y en los detalles técnicos del producto; en consecuencia, ello significa que las unidades de adoquín convencional necesitarán más agua para el curado respectivo.

La investigación considera dentro de sus limitaciones que los adoquines, durante el proceso de curado, no absorben el agua que fue vertida en ellos; de esta manera, todo el líquido que ingresa al flujo de materia es considerado como residuo dentro del flujo de salida.

La tabla 4.19 muestra las entradas y salidas del proceso de curado de los adoquines.

Tabla 4.19: Proceso unitario de curado del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario : Vibrado y moldeado del material (Adoquín Reciclado) | | |
|--|----------------------|---------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín reciclado vibrados y moldeados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Mezcla amasada para la producción de adoquines reciclados | 1 | Toneladas |
| Bloquetera Rosa Cometa (modelada) Alloc Def, U | 4.8×10^{-4} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 210 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Vibrado y moldeado del material (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín convencional vibrado y moldeados | 1 | Toneladas |
| Entradas conocidas: Materia y energía | | |
| Mezcla amasada para la producción de adoquines convencionales | 1 | Toneladas |
| Bloquetera Rosa Cometa (modelada) Alloc Def, U | 4.8×10^{-4} | pieza |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 210 | MJ |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | | |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso unitario instalación del material

Este proceso consiste en pavimentar el suelo, con los adoquines peatonales diseñados en la investigación, cuya obtención y producción han sido descritas en los procesos señalados anteriormente.

Ahora, teniendo en cuenta la unidad funcional del sistema, la instalación abarca la construcción de la cama de arena y la colocación de las unidades de adoquines. Así también, es necesario mencionar, que por un lado, el valor de la carga ambiental del agregado proveniente del reciclaje (arena reciclada), el cual compone 1 m² de la cama perteneciente a la instalación del adoquín reciclado, depende únicamente de los procesos de clasificación, trituración y tamizado. Por otro lado, el valor de la carga ambiental de la arena natural, el cual compone 1 m² de la cama perteneciente a la instalación del adoquín convencional fue provista por la base de datos de EcoInvent 3.4.

De este modo, la tabla 4.20 muestra los materiales necesarios para pavimentar 1m² de superficie.

Tabla 4.20: Materiales necesarios para la instalación de 1m² de superficie pavimentada con adoquines

| Instalación del adoquín reciclado | | | Instalación del adoquín convencional | | |
|-----------------------------------|----------|-------------------------|--------------------------------------|----------|--------------------------|
| Materiales | Cantidad | Unidad | Materiales | Cantidad | Unidad |
| Adoquín reciclado | 50 | unidades/m ² | Adoquín convencional | 50 | unidades/ m ² |
| Arena reciclada | 40 | kg/m ² | Arena natural | 40 | kg /m ² |
| Agua | 10 | kg/m ² | Agua | 10 | kg/m ² |

Fuente: Elaboración propia

El producto obtenido en el proceso, tanto, para el adoquín reciclado, como para el adoquín convencional, es 1 m² de superficie pavimentada con los adoquines en estudio. El soporte para obtener dicho producto está conformado por la maquinaria que es parte del flujo que ingresa al proceso, las cuales son una Vibro compactadora tipo rana de motor eléctrico y una Placa compactadora que consume diésel para su funcionamiento.

El flujo de materia que ingresa al proceso involucra materiales, requeridos en la instalación, de 1m² de superficie; de este modo, para el caso del adoquín

reciclado ingresa 50 unidades de adoquín reciclado cuyo peso es de 90 kg. , 40 kg. de arena reciclada y 10 kg. de agua potable. Para el caso del adoquín convencional, el flujo de materia está compuesto por 50 unidades de adoquín convencional cuyo peso es de 96 kg. , 40 kg. de arena natural y 10 kg. de agua potable. La investigación considera el uso óptimo y total de los materiales necesarios para la pavimentación; por dicho motivo, este proceso no genera residuos en su flujo de salida.

La tabla 4.21 muestra las entradas y salidas del proceso de instalación de los adoquines.

Tabla 4.21: Proceso unitario de instalación del material para el adoquín convencional y reciclado

| Proceso Unitario: Instalación del material (Adoquín Reciclado) | | |
|--|----------------------|----------------|
| Producto | Cantidad | Unidad |
| 1 m ² de superficie pavimentada con adoquín reciclado | 1 | m ² |
| Entradas conocidas: Materia y energía | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín reciclado curados | 90 | kg |
| Vibrocompactadora tipo Rana (modelada) Alloc Def, U | 4.2x10 ⁻⁷ | pieza |
| Placa Compactadora C120T (modelada) Alloc Def, U | 4.2x10 ⁻⁷ | pieza |
| Agua potable {CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 10 | kg |
| Arena reciclada | 40 | kg |
| Diesel, usado en maquinaria de construcción {GLO} market for Alloc Def, U | 2.2x10 ⁻² | MJ |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 4.5x10 ⁻² | MJ |
| Transporte,camión,>32 metric ton, Euro 3 {GLO} market for Alloc Def, U | 2x10 ⁻¹ | tkm |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | Cantidad | Unidad |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |
| Proceso Unitario : Instalación del material (Adoquín Convencional) | | |
| Producto | Cantidad | Unidad |
| 1 m ² de superficie pavimentada con adoquín convencional | 1 | m ² |
| Entradas conocidas: Materia y energía | Cantidad | Unidad |
| Unidades de adoquín convencional curados | 96 | kg |
| Vibrocompactadora tipo Rana (modelada) Alloc Def, U | 4.2x10 ⁻⁷ | pieza |
| Placa Compactadora C120T (modelada) Alloc Def, U | 4.2x10 ⁻⁷ | pieza |
| Agua potable {CL} Tratamiento convencional Alloc Def, U | 10 | kg |
| Arena {GLO} Alloc Def, U | 40 | kg |
| Diesel, usado en maquinaria de construcción {GLO} market for Alloc Def, U | 2.2x10 ⁻² | MJ |
| Electricidad,bajo voltaje{PE} Transformado a bajo voltaje Alloc Def, U | 4.5x10 ⁻² | MJ |
| Transporte,camión,>32 metric ton, Euro 3 {GLO} market for Alloc Def, U | 2.6 | tkm |
| Salidas conocidas: Residuos y emisiones | Cantidad | Unidad |
| Este proceso no tiene residuos ni emisiones | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Proceso de transporte

Este proceso consiste en ingresar al inventario, el impacto ambiental producido por la movilización de los agregados naturales o reciclados. Para el traslado de estos agregados, la investigación considera solo la distancia existente, desde el lugar de obtención de estos, hasta la planta de producción; debido a que, existe mucha variabilidad en el tramo comprendido, entre el lugar de fabricación y las obras viales; por ello y para fines prácticos, se consideró la instalación, al interior de la planta de producción de adoquines.

El valor del proceso de transporte está establecido por el producto de la cantidad de agregados transportados, (en toneladas) y la distancia recorrida, (en kilómetros); de esta forma, la unidad del producto obtenido es TKM (toneladas por kilómetros). El peso de los materiales a ser transportados depende de los requerimientos establecidos, en el proceso de instalación, los cuales comprenden 40 kg. para la cama de arena y los agregados que componen las 50 unidades de adoquín necesarias para la instalación de 1m².

El soporte del proceso de transporte es un camión, el cual tiene un peso mayor a 32 toneladas y pertenece a la categoría EURO3, dichas características fueron obtenidas, para el modelamiento en el software Simapro 8.5, en la base de datos de EcoInvent 3.4.

La distancia que serán transportados los agregados reciclados, comprenden el tramo del vertedero de Cieneguilla a la planta de producción, la cual es aproximadamente de 1.5 km. Para el caso del adoquín convencional, el estudio considera una distancia aproximada de 19.4 km, comprendida desde la cantera del río Huallaga, hasta la ciudad de Huánuco, lugar donde se encuentra un gran número de plantas de producción de adoquín convencional.

Pese a la diferencia de distancias, si el tramo considerado, para el adoquín convencional, hubiese abarcado desde la cantera de río Huallaga, hasta la planta de producción ubicada en Lima, el impacto ambiental producido por el proceso de transporte incrementaría exponencialmente; ya que, la distancia comprendida, entre estos dos puntos, es de 435 km. Sobre ello, dentro del capítulo de discusión de resultados se analizará las consecuencias, en las categorías de impacto, referentes a las distancias consideradas.

La tabla 4.22 presenta el proceso de transporte incluido en el inventario; además, la figura 4.15 muestra la distancia comprendida entre la cantera del río Huallaga y la ciudad de Huánuco.

Tabla 4.22: Detalles para el proceso unitario de transporte (incluido en el proceso de instalación)

| Tipo de Transporte | Consideración | Lugar de partida- Lugar de llegada | Distancia (km) | Carga (TKM) |
|--------------------|---------------|--|----------------|-----------------------|
| Camión (Lorry) | Euro 3 | Cantera Chullqui-Huánuco (Cuidad) | 19.4 | 2.64 |
| Camión (Lorry) | Euro 3 | Botadero (Cieneguilla) - Planta piloto | 1.5 | 1.95×10^{-1} |

Fuente: Elaboración propia

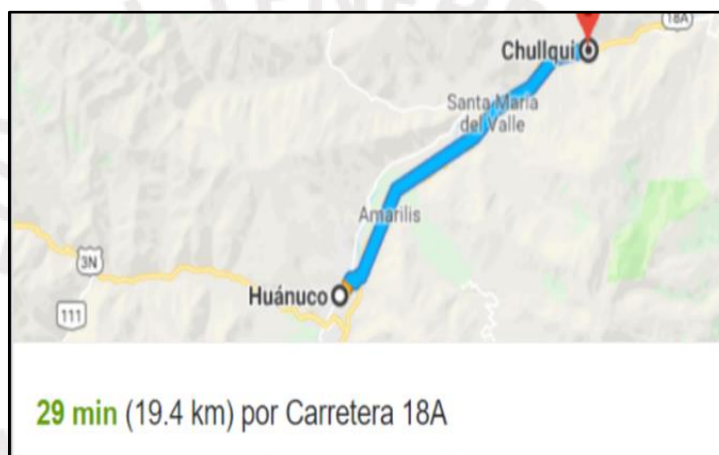


Figura. 4.15: Distancia aproximada desde la ciudad de Huánuco a la cantera de Chullqui. Fuente: Google Maps

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo analiza los resultados de evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida de los adoquines.

5.1 EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA (EICV)

La evaluación del impacto ambiental se realiza teniendo en cuenta las categorías de impactos ambientales establecidos en la investigación y los dos tipos de adoquines a comparar (adoquín reciclado y adoquín convencional).

En la investigación se ha incluido un escenario de adoquín idealizado, que consiste en una representación del adoquín convencional, dado que utiliza agregados naturales, pero con las mismas características de diseño que el adoquín reciclado, es decir que contiene la misma proporción de cemento, agua y agregados en su dosificación y la misma distancia de transporte hacia la planta de producción.

Adicionalmente, el estudio incorpora barras de error en los resultados del adoquín convencional y adoquín reciclado, para una variación de $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, lo cual permite visualizar con mayor detalle el comportamiento del impacto ambiental generado por su consumo, dado que el uso de cemento incide directamente en el sector construcción, debido a que se utiliza como indicador del desarrollo económico, social y ambiental de un país (CAPECO, 2019).

La tabla 5.1 presenta la cantidad de cemento utilizado en la dosificación del adoquín convencional y reciclado con sus respectivas barras de error y del adoquín idealizado, para una tonelada de mezcla.

Tabla 5.1: Cantidad de cemento en los tipos de adoquines a comparar

| Tipos de adoquines | | Escenario | Cantidad de cemento en 1 tonelada de mezcla dosificada |
|--|---|------------|--|
| Adoquín reciclado | | Real | 128 kg |
| Adoquín convencional | | Real | 187 kg |
| Adoquín idealizado (adoquín convencional con igual dosificación que el reciclado) | | Idealizado | 128kg |
| BARRAS DE ERROR | | | |
| Adoquín reciclado | 10% adicional de cemento en la dosificación | | 141 kg |
| | 10% menos de cemento en la dosificación del adoquín | | 115 kg |
| Adoquín convencional | 10% adicional de cemento en la dosificación | | 206 kg |
| | 10% menos de cemento en la dosificación del adoquín | | 168 kg |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de EICV son referenciados por la unidad funcional del sistema, el cual es un metro cuadrado de la superficie pavimentada, que vincula los procesos desde la obtención de materiales hasta la instalación del adoquín. Adicionalmente, se ha incluido los resultados de los impactos ambientales producidos en la obtención de una tonelada de agregados que está relacionado exclusivamente al proceso de obtención de materiales; asimismo, se incluye los impactos ambientales producidos en la obtención de una unidad de adoquín, que vincula los procesos desde la obtención de materiales hasta la producción de dicha unidad de adoquín.

La figura 5.1 muestra los procesos relacionados a la unidad funcional del sistema, así como también los procesos vinculados a la obtención de 1 tonelada de adoquín y 1 unidad de adoquín que se toman como referencia para comparar lo impactos ambientales durante el ciclo de vida.

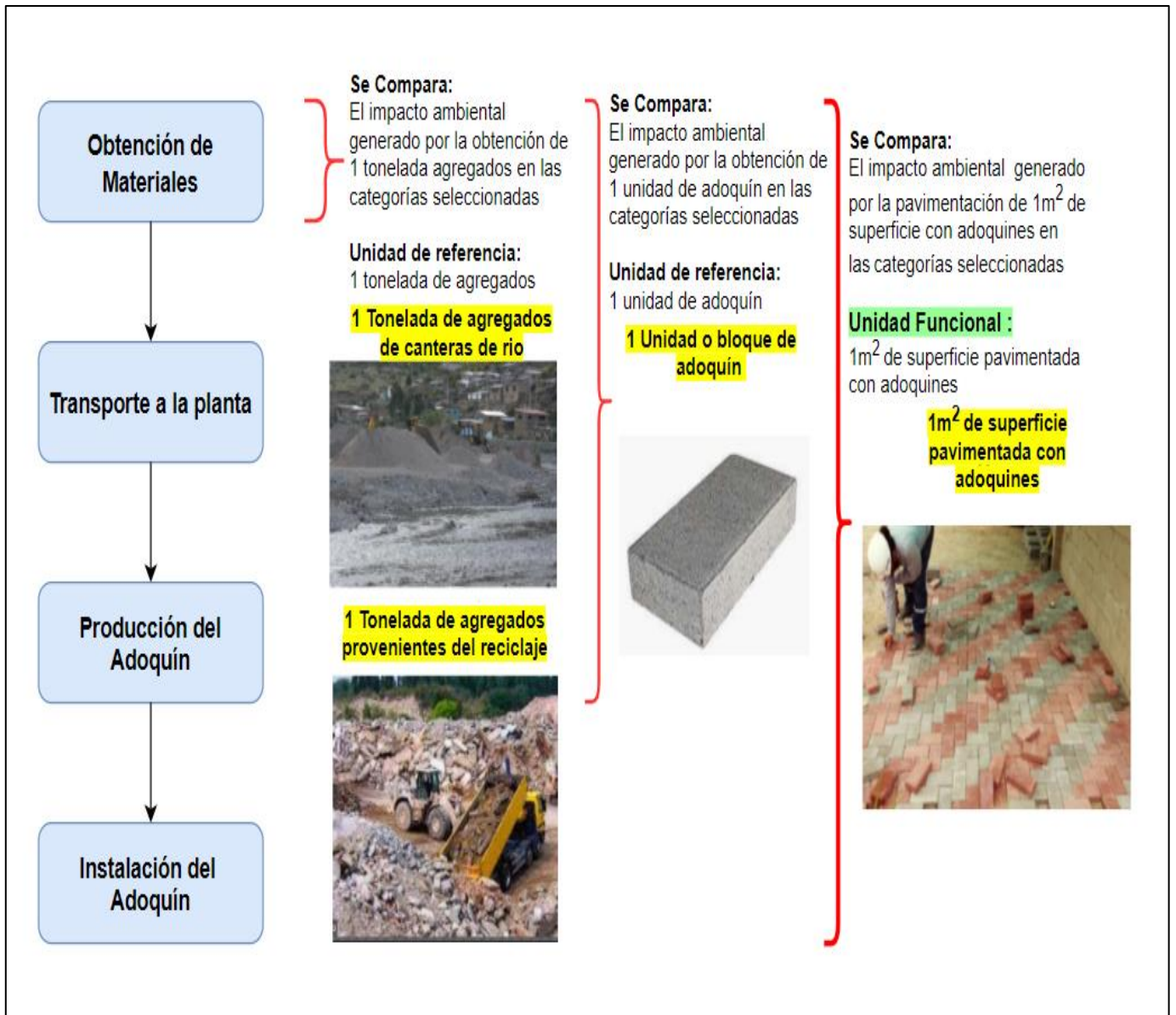





Figura 5.1: Procesos vinculados a la unidad funcional y a las unidades de referencia de los adoquines en comparación. Fuente: Elaboración propia

5.1.1. Potencial de calentamiento global

Los resultados de la categoría de potencial de calentamiento global, para los adoquines a comparar, son obtenidos mediante el uso de la metodología IPCC 2013 GWP 100a v1.03, dentro del programa SimaPro 8.05. La unidad utilizada para dicha categoría es kgCO₂-eq.

La tabla 5.2 presenta los resultados de la categoría de potencial de calentamiento global, para los adoquines a comparar, referidos al impacto generado por 1m² de superficie pavimentada con adoquines (unidad funcional), adicionalmente se muestra el impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados y 1 unidad de adoquín (unidades de referencia).

Tabla 5.2: Resultados para la categoría potencial de calentamiento global

| Categoría de Impacto: Potencial de calentamiento global | | Unidades de referencia en el ciclo de vida | | UNIDAD FUNCIONAL |
|--|---|---|--|---|
| | | Impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados | Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín | Impacto generado por 1m ² de superficie pavimentada con adoquines |
| | |  |  |  |
| ADOQUÍN RECICLADO | | 0.55 kgCO ₂ -eq/tonelada de agregado | 0.22 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 11.1 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | | 8.7 kgCO ₂ -eq/tonelada de agregado | 0.33 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 17.2 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN IDEALIZADO | | - | 0.25 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 13.2 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| BARRAS DE ERROR | | | | |
| Barras de error para adoquín reciclado | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 0.24 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 12 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 0.20 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 10.3 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| Barras de error para adoquín convencional | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 0.36 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 16 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 0.30 kgCO ₂ -eq/unidad de adoquín | 18.7 kgCO ₂ -eq/m ² de adoquín instalado |

Fuente: Elaboración propia.

Impacto generado en la obtención de 1 tonelada de agregados

El impacto ambiental es evaluado teniendo como unidad de referencia 1 tonelada de agregados, lo cual permite comparar y analizar la diferencia entre la obtención de agregados naturales y agregados reciclados.

La figura 5.2 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de potencial de calentamiento global en la obtención de 1 tonelada de agregados naturales y agregados reciclados (kgCO₂-eq/tonelada de agregados), los cuales

serán destinados a la producción de adoquín convencional y adoquín reciclado respectivamente.

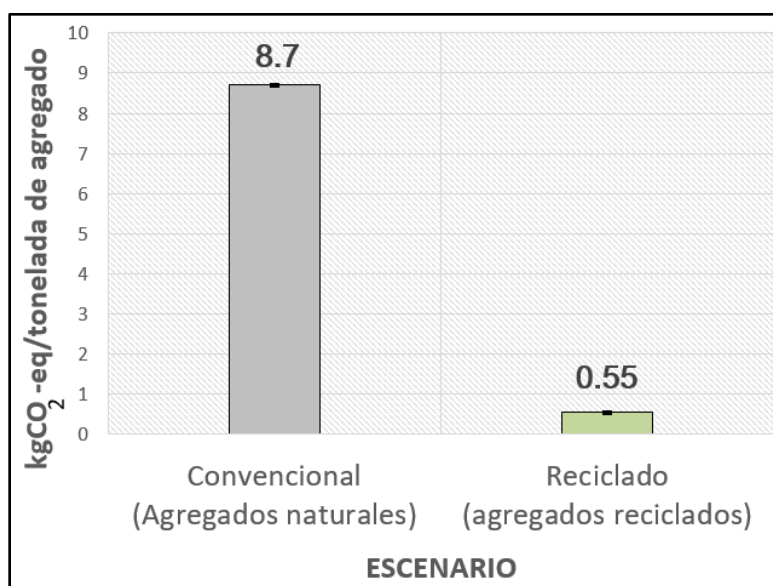


Figura 5.2: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global en la obtención de 1 tonelada de agregados.

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.2 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 tonelada de agregados naturales para la producción de adoquín convencional es 8.7 kgCO₂-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 16 veces más que la obtención de 1 tonelada de agregado reciclado cuyo valor es de 0.55 kgCO₂-eq, el cual es destinado para la producción de adoquín reciclado.

La significativa diferencia entre el impacto ambiental generado en la obtención de 1 tonelada de agregados, es debido a que en la investigación se considera que los agregados provenientes del reciclaje no aportan una carga ambiental (carga ambiental nula), a diferencia de los agregados naturales (arena y grava) que si aportan una carga ambiental; por lo que en la obtención de 1 tonelada de agregados reciclados solo se considera la carga ambiental producido por la maquinaria.

Si bien, por un lado no se consideran los procesos de demolición y transporte hacia el vertedero, dentro del alcance, los cuales aumentan la carga ambiental en la obtención de 1 tonelada de agregados reciclados, por otro lado tampoco se consideran dentro del alcance los impactos evitados por el reciclaje, que

disminuyen la carga ambiental, como señala el estudio de Yazdanbakhsh et al. (2018), que considera los procesos referentes al desecho de materiales como impactos evitados dentro del alcance y el estudio de Knoeri et al. (2018), que considera los procesos de eliminación desechos y la recuperación de la chatarra de acero, dentro de su alcance. En consecuencia los impactos ambientales generados por la obtención de 1 tonelada de agregados en la investigación están vinculadas exclusivamente al proceso de obtención de materiales el cual consiste en la extracción y acopio de áridos en la fuente (cantera o vertedero).

Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín

El impacto ambiental es evaluado teniendo como unidad de referencia 1 unidad de adoquín, lo cual permite comparar y analizar la diferencia entre 1 bloque de un adoquín convencional, un adoquín reciclado y un adoquín idealizado, donde se consideran los procesos desde la obtención de materiales hasta la producción de dicha unidad de adoquín.

La figura 5.3 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de potencial de calentamiento global en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional, reciclado e idealizado (kgCO₂-eq/unidad de adoquín). Asimismo se muestran los resultados de las barras de error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en $\pm 10\%$ de cemento en su dosificación.

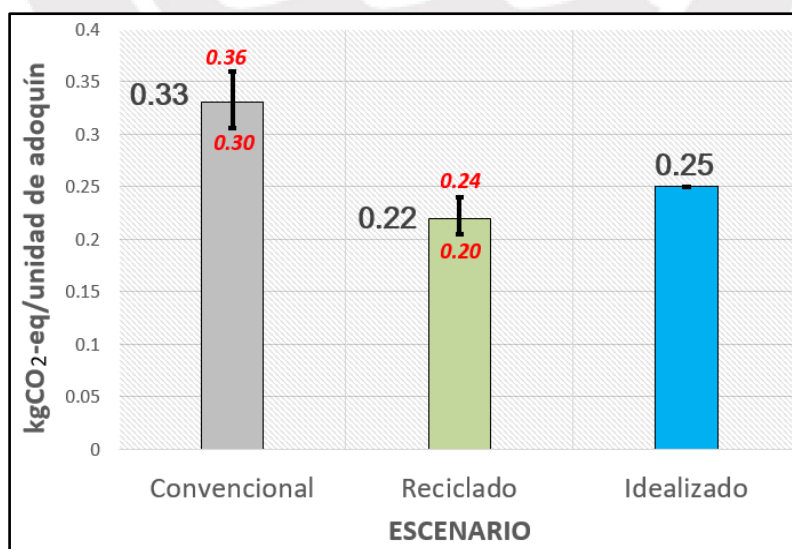


Figura 5.3: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global por la obtención de 1 unidad de adoquín.

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.3 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín convencional es 0.33 kgCO₂-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 50% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado cuyo valor es de 0.22 kgCO₂-eq. Asimismo, el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín idealizado es 0.25 kgCO₂-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 13% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado.

A pesar de que 1 unidad de adoquín idealizado, tiene la misma cantidad de cemento, distancia de transporte y misma maquinaria de producción que 1 unidad de adoquín reciclado, siguen existiendo una contaminación mayor en 13%, debido a que el adoquín idealizado utiliza en su dosificación agregados naturales, los cuales generan una mayor contaminación que los agregados provenientes del reciclaje. Sin embargo, se puede observar que la diferencia de 50% entre el adoquín convencional y reciclado se ve reducido a una diferencia en 13% al comparar el adoquín idealizado con el adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, mostradas en la figura 5.5, presentan una variación de $\pm 8\%$ en el impacto ambiental generado tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional como en la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado. En lo que se observa que la diferencia entre el impacto generado en la obtención de 1 unidad de adoquín idealizado (0.25 kgCO₂-eq) y 1 unidad de adoquín reciclado con un 10% adicional de cemento en su dosificación (0.24 kgCO₂-eq), no es significativa.

Impacto generado por la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional)

El impacto ambiental del ACV es evaluado teniendo como unidad funcional 1 m² de superficie pavimentada con adoquines, lo cual permite comparar y analizar la diferencia entre 1m² de superficie pavimentada con adoquín convencional, adoquín reciclado y adoquín idealizado, donde se consideran todos los procesos involucrados dentro del alcance de la investigación, es decir desde la obtención de materiales hasta la instalación de los adoquines.

La figura 5.4 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de potencial de calentamiento global en la pavimentación de 1m² de superficie con adoquín convencional, reciclado e idealizado (kgCO₂-eq/m² de adoquín instalado). Asimismo se muestran los resultados de la barra e error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en ± 10% de cemento en su dosificación.

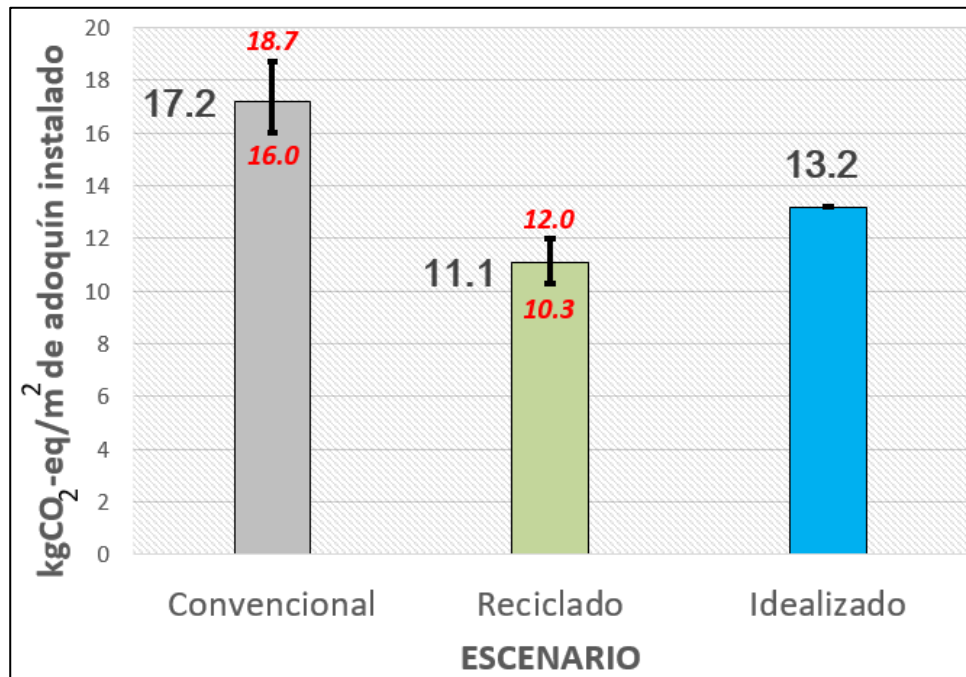


Figura 5.4: Método IPCC-Resultados para la categoría de potencial de calentamiento global en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín.

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.4 muestra que el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional es 17.2 kgCO₂-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 56% más que la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín reciclado cuyo valor es de 11.1 kgCO₂-eq. Asimismo, el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín idealizado es 13.2 kgCO₂-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 18% más que la pavimentación de 1 m² unidad de superficie con adoquín reciclado.

A pesar de que la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín idealizado, tiene la misma cantidad de cemento, distancia de transporte y misma maquinaria

de producción e instalación que la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín reciclado, siguen existiendo una contaminación mayor en 18%, debido a que el adoquín idealizado utiliza en su dosificación e instalación (cama de arena) agregados naturales, los cuales generan una mayor contaminación que los agregados provenientes del reciclaje. Sin embargo, se puede observar que la diferencia de 56% al comparar la pavimentación con adoquín convencional y la pavimentación con adoquín reciclado se ve reducido a una diferencia en 18% al comparar la pavimentación con el adoquín idealizado y la pavimentación con adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, mostradas en la figura 5.6, presentan una variación aproximada de $\pm 8\%$ en el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional y con adoquín reciclado.

Por lo que tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín como en la pavimentación de 1 m² de superficie, se observa un comportamiento lineal y proporcional entre consumo de cemento y el impacto ambiental para la categoría de potencial de calentamiento global, es decir que a mayor consumo de cemento, mayor es la magnitud del impacto ambiental, en consecuencia es recomendable respetar el diseño establecido para la elaboración de los adoquines.

Adicionalmente, la tabla 5.3 y la figura 5.5 muestran la distribución porcentual de los impactos generados para la categoría de potencial de calentamiento global, en cada una de las etapas de ACV y los elementos importantes en el ACV para la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional) con adoquines convencionales y adoquines reciclados, las unidades están expresadas en kgCO₂-eq/ m².

Tabla 5.3: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de potencial de calentamiento global

| Tipo de adoquín | Impacto generado | Etapas del ACV | | | Elementos importantes del ACV | | |
|----------------------|--|-------------------------|-------|--|--|-------|--|
| | | | | | | | |
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 3.1% | 0.6 kgCO ₂ -eqv/m ² | Agregados | 2.7% | 0.5 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| | 17.2 kgCO ₂ -eq/m ² (100%) | Producción | 92.8% | 15.9 kgCO ₂ -eqv/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 21.8% | 3.7 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| | | Instalación | 4.1% | 0.7 kgCO ₂ -eqv/m ² | Cemento | 71.4% | 12.3 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| | | | | | otros | 2.7% | 0.2 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| ADOQUÍN RECICLADO | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 0.1% | 1x10 ⁻² kgCO ₂ -eqv/m ² | Agregados | 0% | 0 |
| | 11.1 kgCO ₂ -eq/m ² (100%) | Producción | 99% | 11 kgCO ₂ -eqv/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 32.7% | 3.6 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| | | Instalación | 0.9% | 9x10 ⁻² kgCO ₂ -eqv/m ² | Cemento | 66.4% | 7.4 kgCO ₂ -eqv/m ² |
| | | | | | otros | 0.2% | 2x10 ⁻² kgCO ₂ -eqv/m ² |

Fuente: Elaboración propia

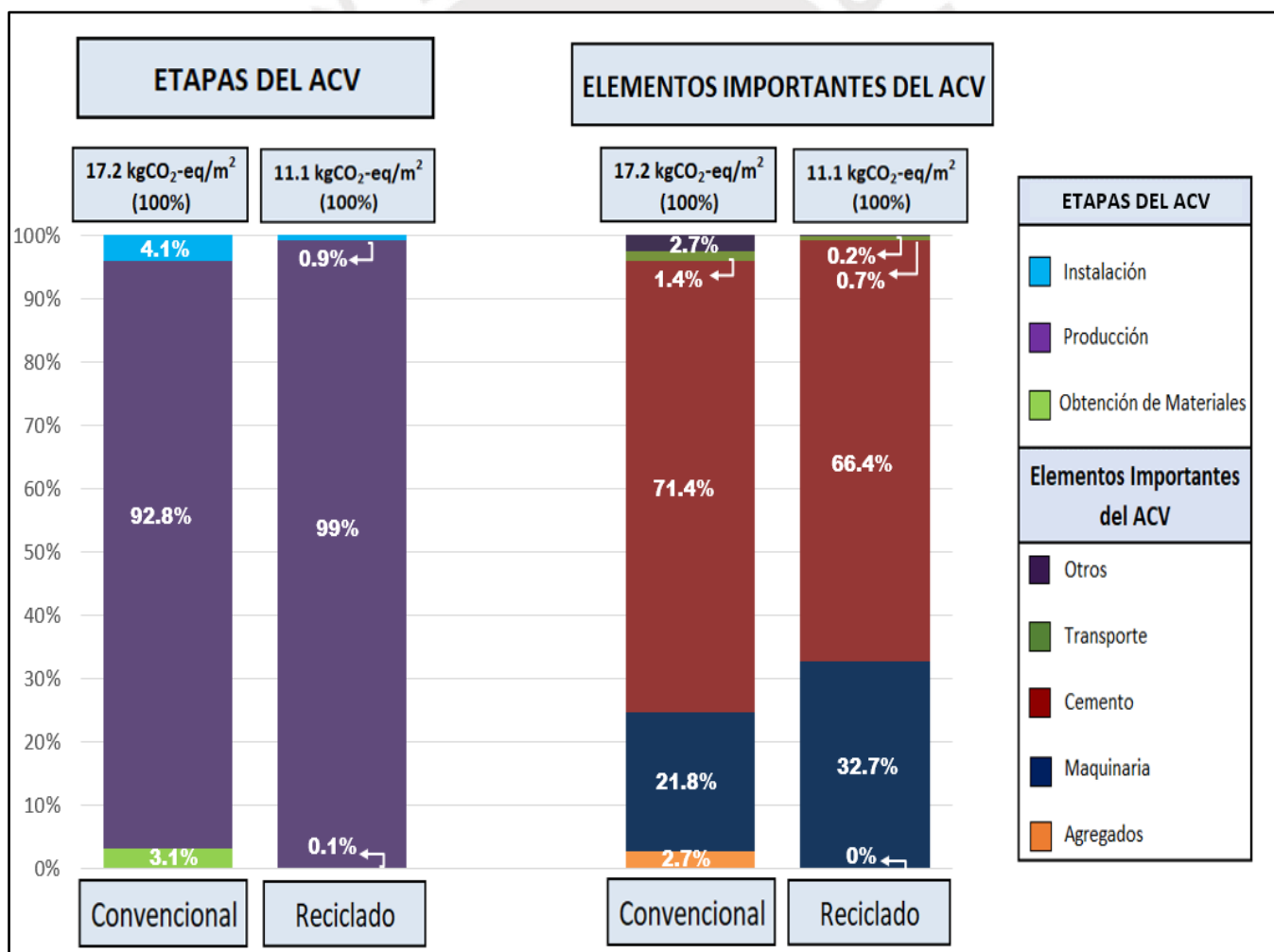


Figura 5.5: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de potencial de calentamiento global.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 5.3 y la figura 5.5 muestran que la mayor contribución al impacto generado para la categoría de potencial de calentamiento global, en la pavimentación de 1m², sea con adoquines convencionales o reciclados, pertenece a la etapa de producción, que representa aproximadamente un 93% y 99% respectivamente, debido en gran medida al consumo de cemento durante la dosificación y la maquinaria utilizada en la clasificación, trituración, tamizado, mezclado, moldeado y vibrado.

Al analizar los elementos importantes del ACV, el consumo de cemento durante la dosificación en la etapa de producción es la que mayor contribuye al impacto ambiental para la categoría de potencial de calentamiento global tanto para los adoquines convencionales como para los adoquines reciclados, representando aproximadamente un 71% y 66% respectivamente.

5.2.2. Consumo de energía primaria

Los resultados de la categoría de consumo de energía primaria, para los adoquines a comparar, son obtenidos mediante el uso de la metodología *Cumulative Energy Demand* (CED) v1.11, dentro del programa SimaPro 8.05. La unidad utilizada para dicha categoría es Mega Joules (MJ).

La tabla 5.4 presenta los resultados de la categoría de consumo de energía primaria, para los adoquines a comparar, referidos al impacto generado por 1m² de superficie pavimentada con adoquines (unidad funcional), adicionalmente se muestra el impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados y 1 unidad de adoquín (unidades de referencia).

Tabla 5.4: Resultados para la categoría consumo de energía primaria

| Categoría de Impacto: Consumo de energía primaria | | Unidades de referencia en el ciclo de vida | | UNIDAD FUNCIONAL |
|--|---|---|--|---|
| | | Impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados | Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín | Impacto generado por 1m ² de superficie pavimentada con adoquines |
| | |  |  |  |
| ADOQUÍN RECICLADO | | 8.3 MJ/tonelada de agregado | 1.22 MJ/unidad de adoquín | 61.4 MJ/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | | 124 MJ/tonelada de agregado | 1.66 MJ/unidad de adoquín | 93.7 MJ/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN IDEALIZADO | | - | 1.47 MJ/unidad de adoquín | 84.3 MJ/m ² de adoquín instalado |
| BARRAS DE ERROR | | | | |
| Barras de error para adoquín reciclado | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 1.26 MJ/unidad de adoquín | 63.3 MJ/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 1.18 MJ/unidad de adoquín | 59.5 MJ/m ² de adoquín instalado |
| Barras de error para adoquín convencional | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 1.72 MJ/unidad de adoquín | 96.7 MJ/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 1.6 MJ/unidad de adoquín | 90.7 MJ/m ² de adoquín instalado |

Fuente: Elaboración propia

Impacto generado en la obtención de 1 tonelada de agregados

La figura 5.6 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de consumo de energía primaria en la obtención de 1 tonelada de agregados naturales y agregados reciclados (MJ/tonelada de agregados), los cuales serán destinados a la producción de adoquín convencional y adoquín reciclado respectivamente.

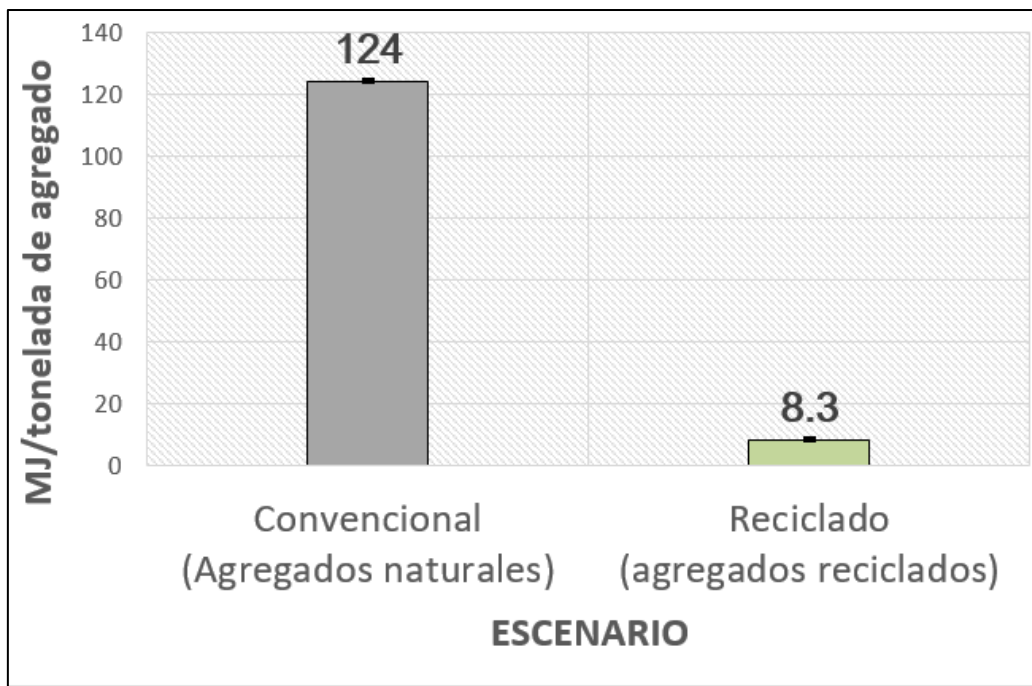


Figura 5.6: Método Cumulative Energy Demand (CED) - Resultados para la categoría consumo de energía primaria en la obtención de 1 tonelada de agregados. Fuente: Elaboración propia

La figura 5.6 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 tonelada de agregados naturales para la producción de adoquín convencional es 124 MJ, el cual representa una contaminación de aproximadamente 15 veces más que la obtención de 1 tonelada de agregado reciclado cuyo valor es de 8.3 MJ, el cual es destinado para la producción de adoquín reciclado.

La significativa diferencia entre el impacto ambiental generado en la obtención de 1 tonelada de agregados, es similar a la categoría de potencial de calentamiento global, debido a que en la investigación se considera que los agregados provenientes del reciclaje no aportan una carga ambiental (carga ambiental nula), a diferencia de los agregados naturales (arena y grava) que si aportan una carga ambiental; por lo que en la obtención de 1 tonelada de agregados reciclados solo se considera la carga ambiental producido por la maquinaria.

Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín

La figura 5.7 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de consumo de energía primaria en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional, reciclado e idealizado (MJ/unidad de adoquín). Asimismo se

muestran los resultados de las barras de error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en $\pm 10\%$ de cemento en su dosificación.

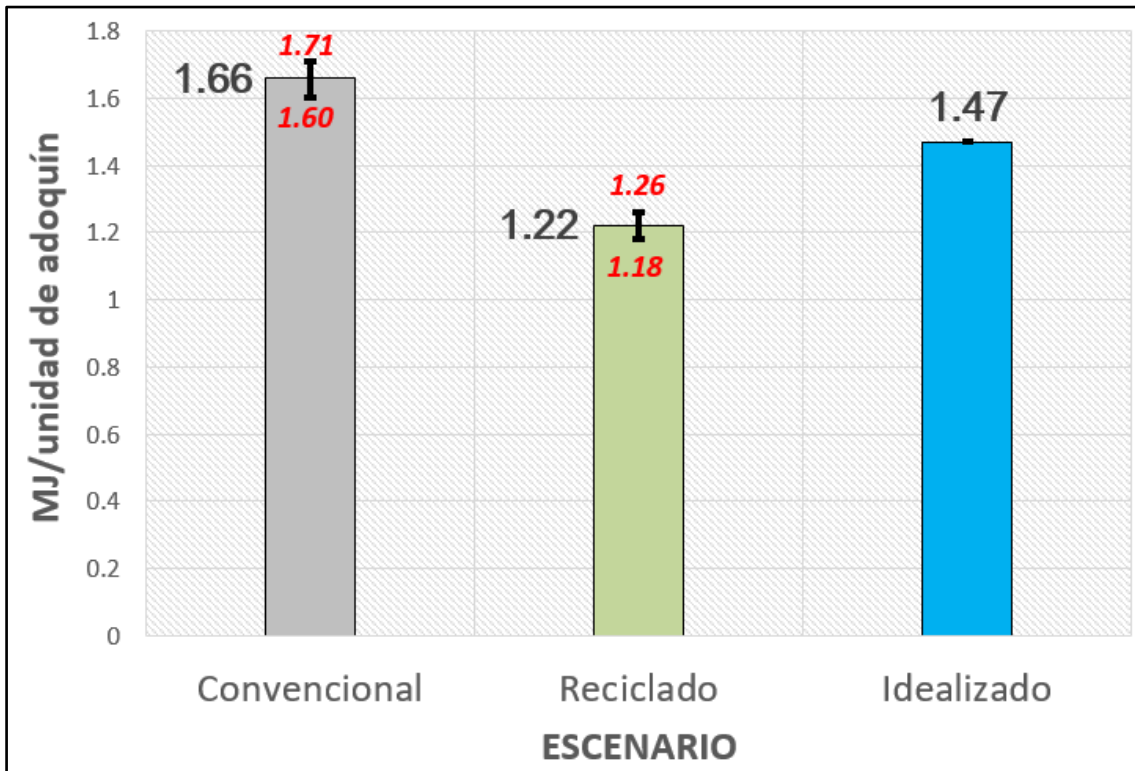


Figura 5.7: Método Cumulative Energy Demand (CED). Resultados para la categoría de consumo de energía primaria en la obtención de 1 unidad de adoquín. Fuente: Elaboración propia

La figura 5.7 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín convencional es 1.66 MJ, el cual representa una contaminación de aproximadamente 36% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado cuyo valor es de 1.22 MJ. Asimismo, el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín idealizado es 1.47 MJ, el cual representa una contaminación de aproximadamente 21% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado.

De igual manera que para la categoría de potencial de calentamiento global, en la categoría de consumo de energía primaria, la diferencia de 36% al comparar la obtención de 1 unidad de adoquín convencional y 1 unidad de adoquín reciclado se ve reducido a una diferencia en 21% al comparar la obtención de 1 unidad de adoquín idealizado y 1 unidad de adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la

dosificación, mostradas en la figura 5.10, presentan una variación aproximada de $\pm 4\%$ en el impacto ambiental generado tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional como en la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado.

Impacto generado por la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional)

La figura 5.8 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de consumo de energía primaria en la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional) con adoquín convencional, reciclado e idealizado (MJ/m² de adoquín instalado). Asimismo se muestran los resultados de la barra e error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en $\pm 10\%$ de cemento en su dosificación.

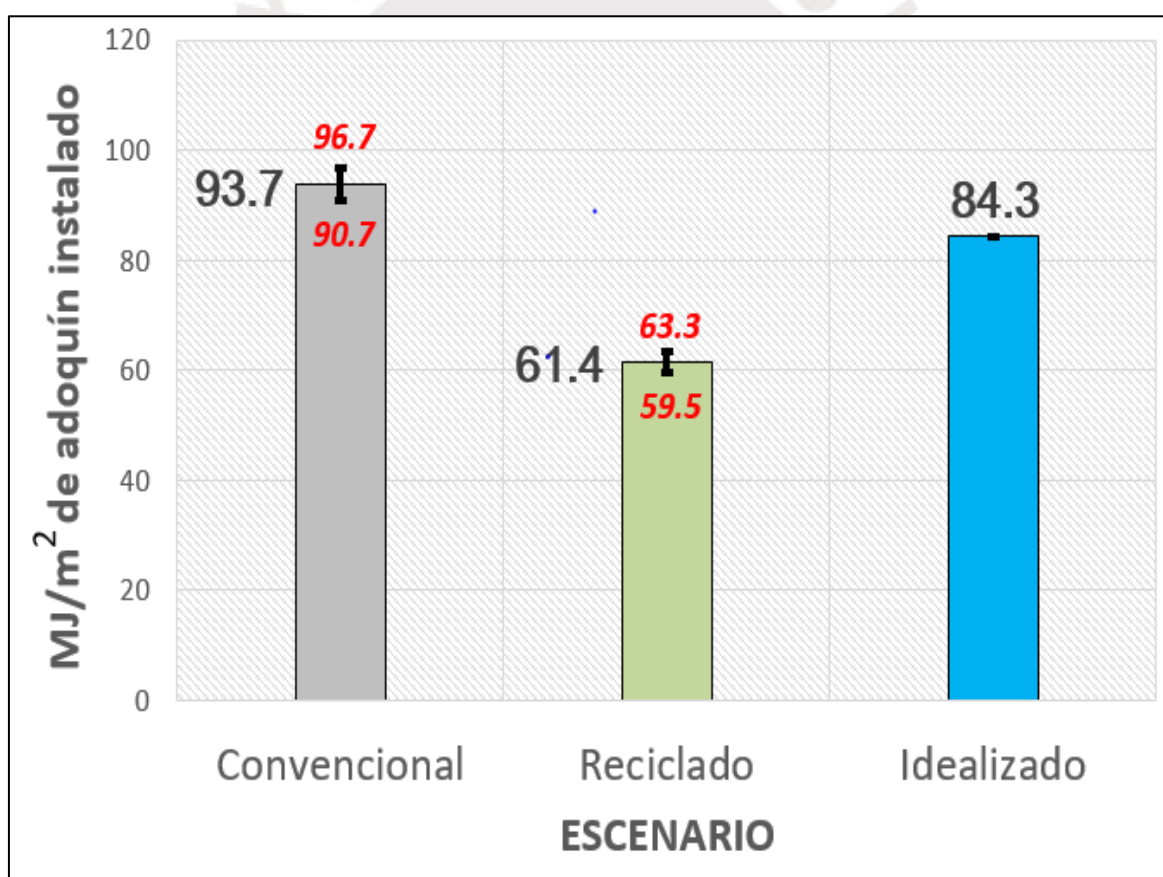


Figura 5.8: Método Cumulative Energy Demand (CED) - Resultados para la categoría de consumo de energía primaria en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín. Fuente: Elaboración propia

La figura 5.8 muestra que el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional es 93.7 MJ, el cual representa una contaminación de aproximadamente 53% más que la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín reciclado cuyo valor es de 61.4 MJ. Asimismo, el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín idealizado es 84.3 MJ, el cual representa una contaminación de aproximadamente 37% más que la pavimentación de 1 m² unidad de superficie con adoquín reciclado.

De igual manera que para la categoría de potencial de calentamiento global, en la categoría de consumo de energía primaria, la diferencia de 56% al comparar la pavimentación con adoquín convencional y la pavimentación con adoquín reciclado se ve reducido a una diferencia en 37% al comparar la pavimentación con el adoquín idealizado y la pavimentación con adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, mostradas en la figura 5.11, presentan una variación aproximada de $\pm 4\%$ en el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional y con adoquín reciclado.

Por lo que al igual que para la categoría de potencial de calentamiento global, tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín como en la pavimentación de 1 m² de superficie, se observa un comportamiento lineal y proporcional entre consumo de cemento y el impacto ambiental.

Adicionalmente, la tabla 5.5 y la figura 5.9 muestran la distribución porcentual de los impactos generados para la categoría de consumo de energía primaria, en cada una de las etapas y los elementos importantes en el ACV para la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional) con adoquines convencionales y adoquines reciclados, las unidades están expresadas en MJ/m².

Tabla 5.5: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de consumo de energía primaria

| Tipo de adoquín | Impacto generado | Etapas del ACV | | | Elementos importantes del ACV | | |
|----------------------|---|-------------------------|-------|--------------------------------------|--|-------|------------------------|
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 7.3% | 6.8 MJ/m ² | Agregados | 6.8% | 6.4 MJ/m ² |
| | 93.7 MJ/m ² (100%) | Producción | 80.5% | 75.4 MJ/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 53.9% | 50.5 MJ/m ² |
| | | Instalación | 12.2% | 11.5 MJ/m ² | Cemento | 27.1% | 25.4 MJ/m ² |
| | | | | | Transporte | 7.8% | 7 MJ/m ² |
| otros | 4.4% | 4 MJ/m ² | | | | | |
| ADOQUÍN RECICLADO | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 0.1% | 5x10 ⁻² MJ/m ² | Agregados | 0% | 0 |
| | 61.4 MJ/m ² (100%) | Producción | 99% | 60.8 MJ/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 76.0% | 46.7 MJ/m ² |
| | | Instalación | 0.9% | 0.55 MJ/m ² | Cemento | 23.1% | 14.2 MJ/m ² |
| | | | | | Transporte | 0.4% | 0.2 MJ/m ² |
| otros | 0.5% | 0.3 MJ/m ² | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

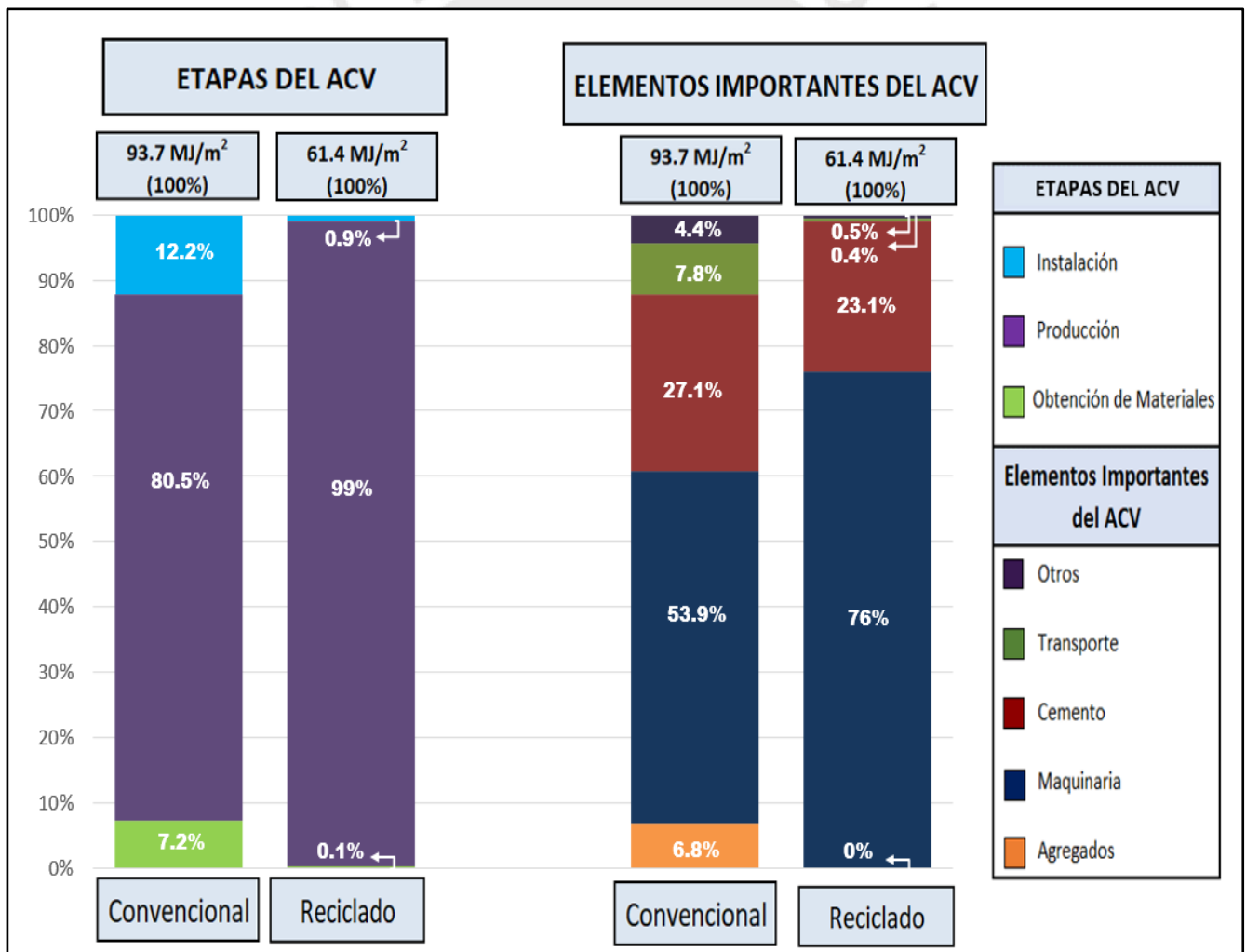


Figura 5.9: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de consumo de energía primaria. Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 5.5 y la figura 5.9 muestran que la mayor contribución al impacto generado para la categoría de consumo de energía primaria, en la pavimentación de 1m², sea con adoquines convencionales o reciclados, pertenece a la etapa de producción, que representa aproximadamente un 81% y 99% respectivamente, debido principalmente a la maquinaria utilizada de soporte en la clasificación, trituración, tamizado, mezclado, moldeado y vibrado; a diferencia de la categoría de potencial de calentamiento global, donde el mayor impacto ambiental es debido al consumo de cemento.




Al analizar los elementos importantes del ACV, la maquinaria usada de soporte (incluyendo la energía de funcionamiento) en las etapas de obtención, producción e instalación genera la mayor contribución al impacto ambiental para la categoría de consumo de energía primaria tanto para los adoquines convencionales como para los adoquines reciclados, representando aproximadamente un 54% y 76% respectivamente.

5.2.3. Agotamiento del mineral

Los resultados de la categoría de agotamiento del mineral, para los adoquines a comparar, son obtenidos mediante el uso de la metodología *ReCipe 2016* v1.03, dentro del programa SimaPro 8.05. La unidad utilizada para dicha categoría es kgCu-eq.

La tabla 5.6 presenta los resultados de la categoría de agotamiento de mineral, para los adoquines a comparar, referidos al impacto generado por 1m² de superficie pavimentada con adoquines (unidad funcional), adicionalmente se muestra el impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados y 1 unidad de adoquín (unidades de referencia).

Tabla 5.6: Resultados para la categoría de agotamiento de mineral

| Categoría de Impacto: Agotamiento del mineral | | Unidades de referencia en el ciclo de vida | | UNIDAD FUNCIONAL |
|--|---|---|--|---|
| | | Impacto generado por la obtención de 1 tonelada de agregados | Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín | Impacto generado por 1m ² de superficie pavimentada con adoquines |
| | |  |  |  |
| ADOQUÍN RECICLADO | | 2.6x10 ⁻² kg Cu-eq/tonelada de agregado | 7.4x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.37 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | | 1.1 kg Cu-eq/ tonelada de agregado | 9.9x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.54 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| ADOQUÍN IDEALIZADO | | 1.1 kg Cu-eq/tonelada de agregado | 9.4x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.51 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| BARRAS DE ERROR | | | | |
| Barras de error para adoquín reciclado | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 7.3x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.36 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 7.5x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.38 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| Barras de error para adoquín convencional | 10% adicional de cemento en la dosificación | - | 9.8x10 ⁻³ kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.55 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |
| | 10% menos de cemento en la dosificación | - | 1x10 ⁻² kg Cu-eq/unidad de adoquín | 0.53 kg Cu-eq/m ² de adoquín instalado |

Fuente: Elaboración propia.

Impacto generado en la obtención de 1 tonelada de agregados

La figura 5.10 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de agotamiento de mineral en la obtención de 1 tonelada de agregados naturales y agregados reciclados (kgCu-eq/tonelada de agregados), los cuales serán destinados a la producción de adoquín convencional y adoquín reciclado respectivamente.

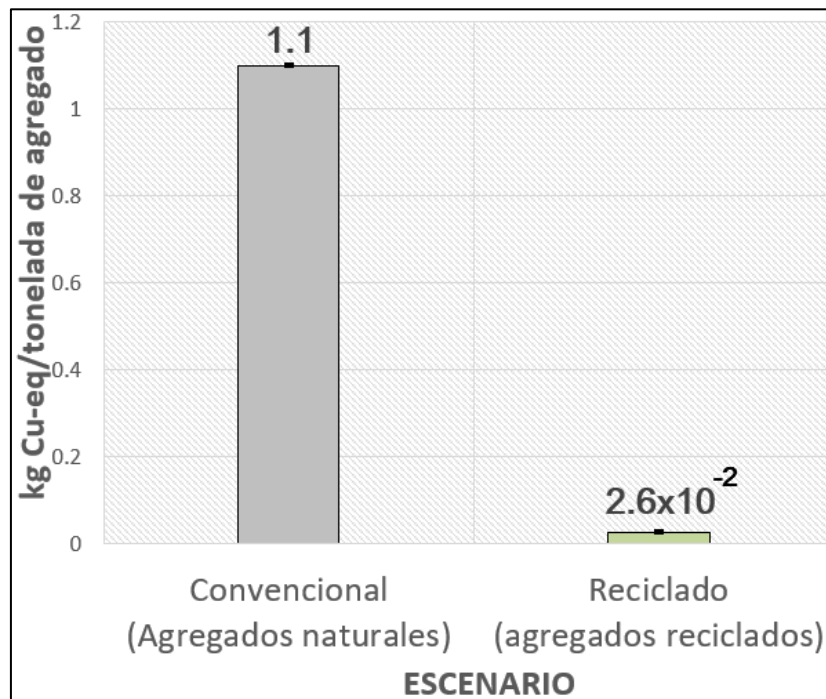


Figura 5.10: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento del mineral en la obtención de 1 tonelada de agregados.
Fuente: Elaboración propia

La figura 5.10 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 tonelada de agregados naturales para la producción de adoquín convencional es 1.1 kgCu-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 42 veces más que la obtención de 1 tonelada de agregado reciclado cuyo valor es de 2.6×10^{-2} kgCu-eq, el cual es destinado para la producción de adoquín reciclado.

La significativa diferencia entre el impacto ambiental generado en la obtención de 1 tonelada de agregados, es debido a que en la investigación se considera que los agregados provenientes del reciclaje no aportan una carga ambiental (carga ambiental nula) y solo se considera la carga ambiental por la maquinaria de soporte, asimismo la agotamiento de mineral hace énfasis en la extracción de agregados, por lo que la diferencia al comparar la obtención de 1 tonelada de agregados convencionales y reciclados, es mucho mayor que para las categorías anteriormente mencionadas.

Impacto generado por la obtención de 1 unidad de adoquín

La figura 5.11 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de

agotamiento de mineral en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional, reciclado e idealizado (kgCu-eq/unidad de adoquín). Asimismo se muestran los resultados de las barras de error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en $\pm 10\%$ de cemento en su dosificación.

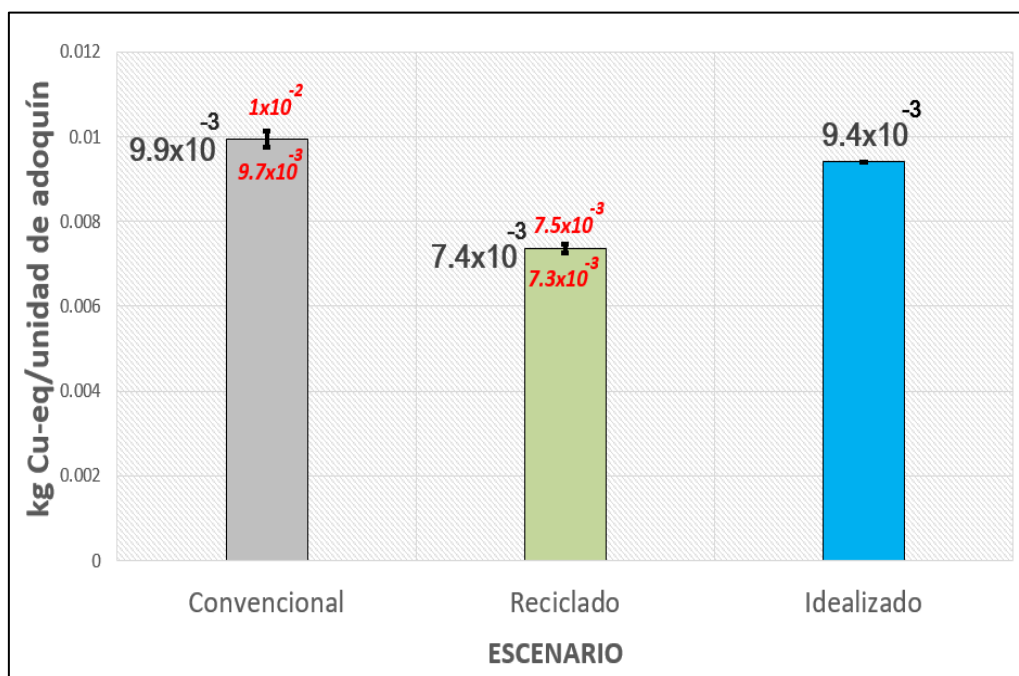


Figura 5.11: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento del mineral en la obtención de 1 unidad de adoquín.

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.11 muestra que el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín convencional es 9.9×10^{-3} kgCu-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 34% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado cuyo valor es de 7.4×10^{-3} kgCu-eq. Asimismo, el impacto ambiental generado en la obtención de una 1 unidad de adoquín idealizado es 9.4×10^{-3} kgCu-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 27% más que la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado.

De igual manera que para las categorías anteriormente mencionadas, en la categoría de agotamiento de mineral, la diferencia de 34% al comparar la obtención de 1 unidad de adoquín convencional y 1 unidad de adoquín reciclado se ve reducido a una diferencia en 27% al comparar la obtención de 1 unidad de adoquín idealizado y 1 unidad de adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, mostradas en la figura 5.15, presentan una variación aproximada de $\pm 2\%$ en el impacto ambiental generado tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín convencional como en la obtención de 1 unidad de adoquín reciclado.

Impacto generado por la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional)

La figura 5.16 muestra el impacto ambiental generado para la categoría de agotamiento de mineral en la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional) con adoquín convencional, reciclado e idealizado (MJ/m² de adoquín instalado). Asimismo se muestran los resultados de la barra e error de los adoquines convencional y reciclado para una variación en $\pm 10\%$ de cemento en su dosificación.

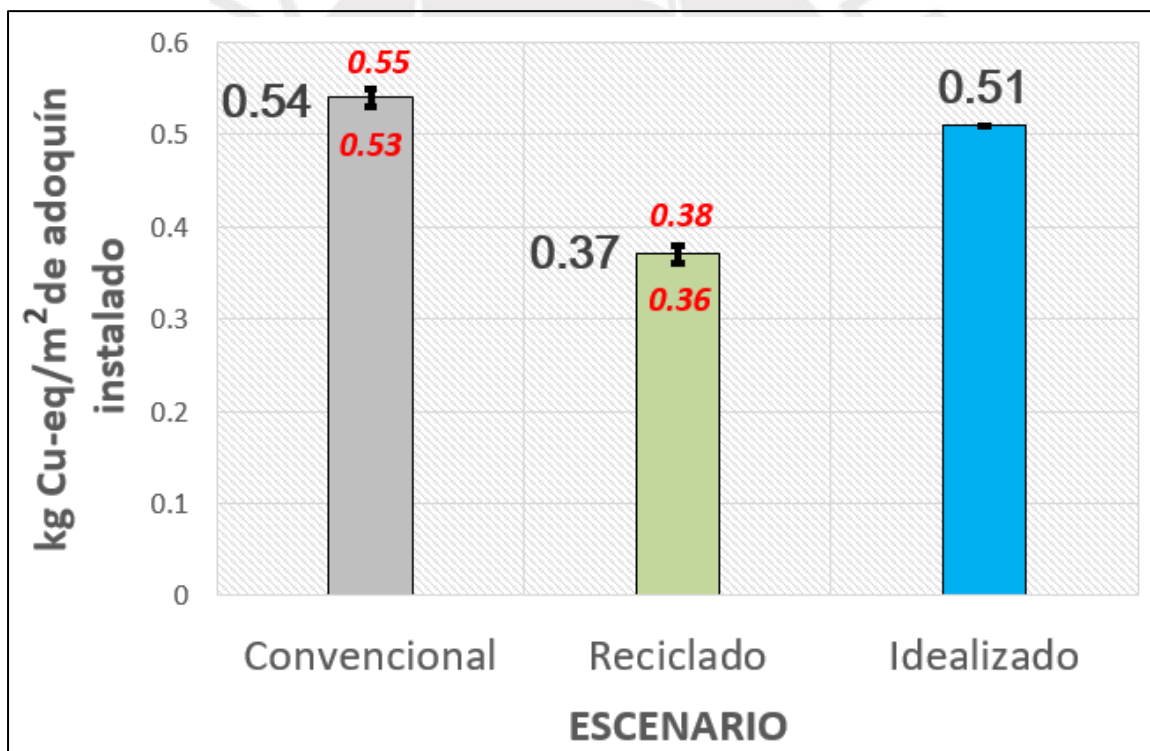


Figura 5.12: Método ReCiPe Midpoint (H) - Resultados para la categoría de agotamiento de mineral en la pavimentación de 1 m² de superficie.

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.12 muestra que el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional es 0.54 kgCu-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 46% más que la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín reciclado cuyo valor es de 0.37 kgCu-eq. Asimismo, el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín idealizado es 0.51 kgCu-eq, el cual representa una contaminación de aproximadamente 38% más que la pavimentación de 1 m² unidad de superficie con adoquín reciclado.

De igual manera que para las categorías anteriormente mencionadas, en la categoría de agotamiento de mineral, la diferencia de 46% al comparar la pavimentación con adoquín convencional y la pavimentación con adoquín reciclado se ve reducido a una diferencia en 38% al comparar la pavimentación con el adoquín idealizado y la pavimentación con adoquín reciclado.

Los valores de las barras de error para una variación $\pm 10\%$ de cemento en la dosificación, mostradas en la figura 5.15, presentan una variación aproximada de $\pm 2\%$ en el impacto ambiental generado en la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín convencional y con adoquín reciclado.

Por lo que al igual que para las categorías anteriormente mencionadas, en la categoría de agotamiento de mineral, tanto en la obtención de 1 unidad de adoquín como en la pavimentación de 1 m² de superficie, se observa un comportamiento lineal y proporcional entre consumo de cemento y el impacto ambiental.

Adicionalmente, la tabla 5.7 y la figura 5.13 muestran la distribución porcentual de los impactos generados para la categoría de agotamiento de mineral, en cada una de las etapas del ACV y los elementos importantes en el ACV para la pavimentación de 1m² de superficie (unidad funcional) con adoquines convencionales y adoquines reciclados, las unidades están expresadas en kgCu-eq/ m².

Tabla 5.7: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de agotamiento de mineral

| Tipo de adoquín | Impacto generado | Etapas del ACV | | | Elementos importantes del ACV | | |
|----------------------|---|-------------------------|-------|---|--|------------|---|
| ADOQUÍN CONVENCIONAL | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 33.9% | 0.18 kg Cu-eq/m ² | Agregados | 33.2% | 0.18 kg Cu-eq/m ² |
| | 0.54 kg Cu-eq/m ² (100%) | Producción | 58.5% | 0.32 kg Cu-eq/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 21.3% | 0.12 kg Cu-eq/m ² |
| | | Instalación | 7.6% | 4x10 ⁻² kg Cu-eq/m ² | Cemento | 37.9% | 0.2 kg Cu-eq/m ² |
| | | | otros | 1.3% | 1x10 ⁻² kg Cu-eq/m ² | Transporte | 6.3% |
| ADOQUÍN RECICLADO | UF: 1m ² de superficie pavimentada | Obtención de materiales | 0.1% | 4x10 ⁻⁴ kg Cu-eq/m ² | Agregados | 0% | 0 |
| | 0.37 kg Cu-eq/m ² (100%) | Producción | 99% | 3.66x10 ⁻¹ kg Cu-eq/m ² | Maquinaria utilizada en el ACV (incluye energía) | 47.0% | 1.74x10 ⁻¹ kg Cu-eq/m ² |
| | | | | | Cemento | 52.1% | 1.92x10 ⁻¹ kg Cu-eq/m ² |
| | | Instalación | 0.9% | 3.6x10 ⁻³ kg Cu-eq/m ² | Transporte | 0.1% | 4x10 ⁻⁴ kg Cu-eq/m ² |
| | | | | | otros | 0.8% | 3.6x10 ⁻³ kg Cu-eq/m ² |

Fuente: Elaboración propia

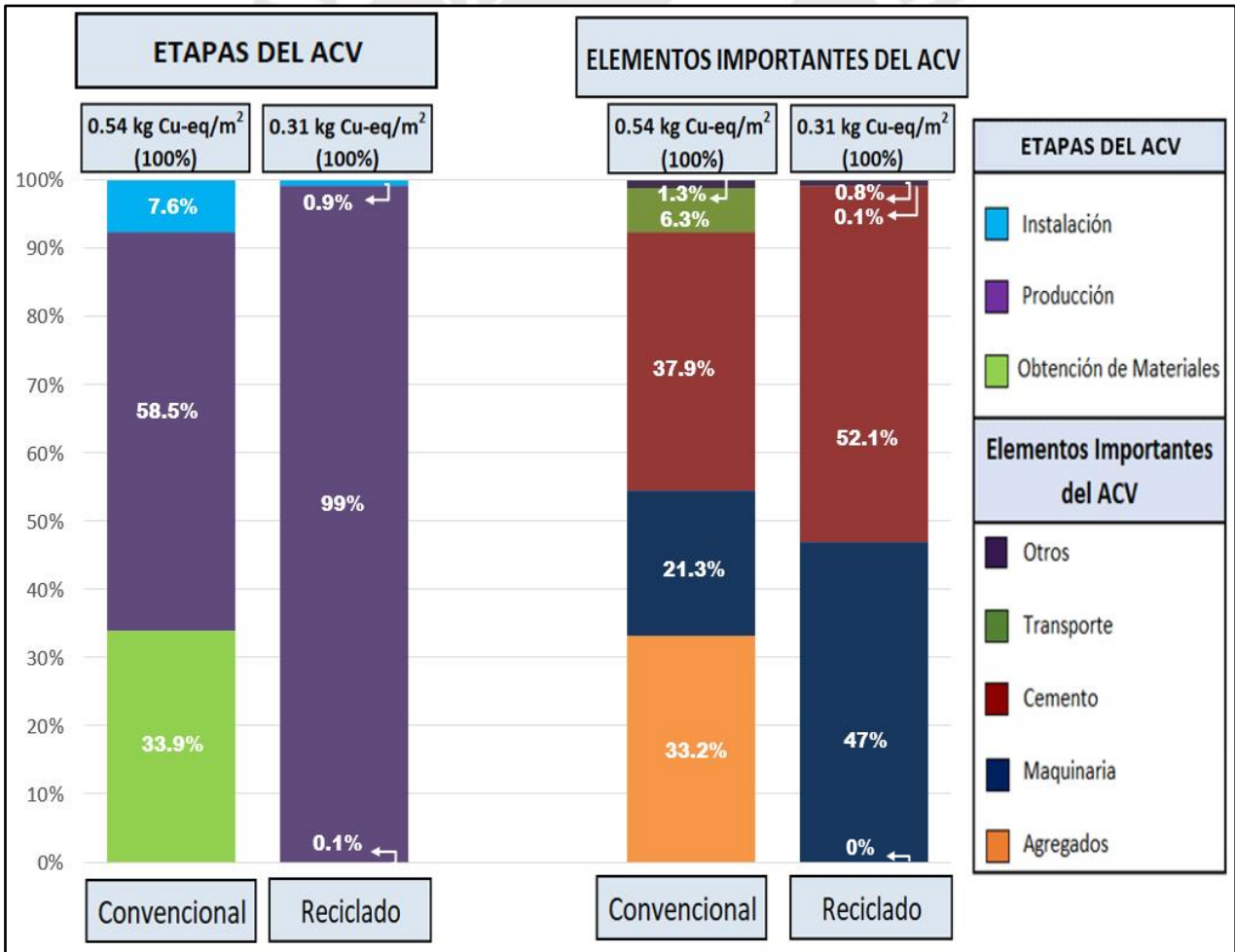


Figura 5.13: Distribución porcentual en la pavimentación de 1 m² de superficie para la categoría de agotamiento de mineral. Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 5.7 y la figura 5.13 muestran que la mayor contribución al impacto generado para la categoría de agotamiento de mineral, en la pavimentación de 1m², sea con adoquines convencionales o reciclados, pertenece a la etapa de producción, que representa aproximadamente un 59% y 99% respectivamente, debido principalmente al consumo de cemento y la maquinaria utilizada de soporte en la clasificación, trituración, tamizado, mezclado, moldeado y vibrado. Sin embargo para adoquín convencional a diferencia de las categorías anteriormente mencionadas se observa un incremento significativo en la etapa de obtención de materiales, debido a que dicha categoría hace énfasis en la extracción de agregados naturales.

Al analizar los elementos importantes del ACV, el consumo de cemento durante la dosificación en la etapa de producción genera la mayor contribución al impacto ambiental para la categoría de agotamiento de mineral tanto para los adoquines convencionales como para los adoquines reciclados, representando aproximadamente un 38% y 52% respectivamente. No obstante, en el adoquín convencional los agregados naturales (arena y grava), al igual que el cemento, representa una parte significativa del impacto ambiental generado con un 33%.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La investigación fue realizada con el objetivo de comparar los impactos ambientales entre el adoquín reciclado y el adoquín convencional peatonal, en el que se utilizó como herramienta el método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), basado en las normas ISO 14040 e ISO 14044. Para el cual se realizó la evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida (EICV) modelado con el soporte del software SimaPro 8.05 para las 3 categorías de impacto ambiental seleccionadas: Potencial de Calentamiento Global, Consumo de Energía Primaria y Agotamiento de Mineral; en el que se consideró como unidad funcional 1 m² de superficie pavimentada, para los 2 tipos de adoquines a comparar y además se incluyó un escenario de adoquín idealizado.

Los resultados determinaron que el impacto ambiental generado, para la categoría de Potencial de Calentamiento Global, en la pavimentación de 1 m² de superficie (unidad funcional) con adoquín convencional (17.2 kgCO₂-eq) representa una contaminación de aproximadamente 56% más que la pavimentación con adoquín reciclado (11.1 kgCO₂-eq). Asimismo, para la categoría de Consumo de Energía Primaria, la pavimentación de 1m² de superficie con adoquín convencional (93.7 MJ), representa una contaminación de aproximadamente 53% más que la pavimentación con adoquín reciclado (61.4 MJ). Así también, para la categoría de Agotamiento de Mineral, la pavimentación de 1m² con adoquín convencional (0.54 kgCu-eq), representa una contaminación de aproximadamente 46% más que la pavimentación con adoquín reciclado (0.37 kgCu-eq).

Por otro lado, al realizar la comparación entre la pavimentación de 1 m² de superficie con adoquín idealizado y con adoquín reciclado, para las categorías de potencial de calentamiento global, consumo de energía primaria y agotamiento de mineral, la pavimentación con adoquín idealizado representa una contaminación de 18%, 37% y 38% más, respectivamente, que la pavimentación con adoquín reciclado.

Al analizar las diferencias comparativas entre los adoquines se puede advertir, que la diferencia de impacto ambiental generado en la comparación entre la pavimentación con adoquín convencional y la pavimentación con adoquín reciclado, se ve reducido, al realizar la comparación entre la pavimentación con adoquín idealizado y la pavimentación con adoquín reciclado, para las 3 categorías seleccionadas; debido a que el adoquín idealizado es una representación del adoquín convencional, donde se consideran las mismas características de diseño del adoquín reciclado, es decir que contiene la misma proporción de cemento, agua y agregados y misma distancia de transporte. En consecuencia para la categoría de potencial de calentamiento global la diferencia de 56% se reduce a 18%, para consumo de energía primaria de 53% a 37% y para agotamiento de mineral de 46% a 38%.

Asimismo, los resultados demostraron en el ACV, que para el adoquín convencional, la etapa de producción es la más significativa debido a que contribuye al impacto ambiental en aproximadamente 93%, 81% y 59%, para las categorías potencial de calentamiento global, consumo de energía y agotamiento de mineral respectivamente. De igual forma para el adoquín reciclado, la etapa de producción es la de mayor significancia debido a que contribuye en aproximadamente 99% para las 3 categorías seleccionadas.

Adicionalmente, al analizar los elementos importantes del ACV o los elementos que mayor contribuyen al impacto ambiental en el ACV, los resultados determinan que para la categoría de potencial de calentamiento global, el consumo de cemento es el que mayor contribuye en el impacto ambiental tanto para el adoquín convencional como para el adoquín reciclado con un 72% y 66% respectivamente. Asimismo, para la categoría de consumo de energía primaria, la maquinaria (incluyendo la energía de funcionamiento) utilizada durante el ACV, es la que mayor contribuye, tanto para el adoquín convencional como para el adoquín reciclado con un 54% y 76% respectivamente. Así también para la categoría de agotamiento de mineral el consumo de cemento es el que mayor contribuye en el impacto ambiental tanto para el adoquín convencional como para el adoquín reciclado con un 38% y 52% respectivamente; no obstante en el adoquín convencional, también los agregados naturales (arena y grava) contribuyen significativamente al impacto con aproximadamente un 33%.

Al analizar la carga ambiental de los agregados reciclados, en la presente investigación se consideró un valor no significativo (nulo), debido a que los residuos de construcción y demolición, al ser destinados al reciclaje y ser usados como materia prima, son amigables ambientalmente y generan un beneficio al medio ambiente. Sin embargo, al comparar el modelamiento de los agregados reciclados con otras investigaciones, como el caso de Hossain et al. (2016), el valor de la carga ambiental de los agregados reciclados no es considerado nulo, debido a que el objetivo del estudio es la obtención de dicha carga, por lo que se realiza un ACV que contempla la composición detallada de dichos agregados, así como un análisis de todos los procesos involucrados desde la generación de los residuos hasta la obtención de los agregados. Asimismo en las investigaciones realizadas por Knoeri et al. (2018) y Yazdanbakhsh et al. (2018), la carga ambiental de los agregados reciclados depende de los impactos evitados, los cuales son incluidos dentro del sistema de ACV y reducen el impacto ambiental del producto, como ejemplo los impactos evitados generados por los procesos referidos a la eliminación de desechos.

Los resultados concluyen que la pavimentación con adoquín reciclado genera un menor impacto ambiental que la pavimentación con adoquín convencional, debido a que se aprovecha el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición como materia prima. Por lo que la presente investigación tiende a incentivar hacia una construcción con criterios de una economía circular, es decir, que se evite o reduzca la depredación de los recursos naturales y se mejore la gestión de los residuos de construcción y demolición (ECOLEC,2019).

Es así que se recomienda tomar conciencia de la sobre explotación de las canteras fluviales, así como promover la práctica del reciclaje, la reducción de los vertidos hacia los botaderos ilegales y el re-uso de los residuos de construcción y demolición una vez cumplido su vida útil, el cual permitirá tender hacia una construcción sostenible con infraestructuras fiables y de calidad, que económicamente sean viables, socialmente equitativos e inclusivos y ambientalmente vivibles.

Lista de Referencias

- Acevedo Agudelo, Harlem, & Vásquez Hernández, Alejandro, & Ramírez Cardona, Diego Alejandro (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 15(1),105-117. [fecha de Consulta 15 de agosto de 2020]. ISSN: 0124-177X. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1694/169424101009>.
- ALCALA. (2017). Evaluación de ciclo de vida. Recuperado el 15 de agosto de 2018, de: <http://www.alcalacr.org/>.
- Anink, D., Boonstra, C., y Mak, J. (1996).: *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*, Londres.
- Bartl, K. (2014). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR CONSTRUCCIÓN. CIV CIVILIZATE, 46-48.
- Baumann Henrike, T. A.-M. (2004). *The Hitch Hiker´s Guide to LCA*. Lund, Sweden: StudentLiterattur.
- Bishop, P. (2000). *Pollution Prevention: Fundamentals and Practice*. Long Grove: McGraw-Hill Science.
- Braungart, M; McDonough, W. (2005). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. Madrid: McGraw- Hill/ interamericana de España.
- Cáceres, Ana (2016) *Análisis De Ciclo De Vida Comparativo De Edificaciones Multifamiliares En Lima Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

- Capuz, S; Gómez, T. (2002). *Ecodiseño. Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles*. Valencia: Editorial de la UPV.
- Chacón, R. (2008). Historia Ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* N° 72, 37-70.
- CILCA. (2019). Conferencia Internacional Análisis de Ciclo de Vida 2019 ACV para la Competividad Global. Recuperado el 20 de diciembre de 2019, de <https://www.cilca2019.org/>.
- CURRAN, Marry Ann. (2012). *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. Publicado en línea. John Wiley & Sons, pp. 1- 41.
- Ecoinvet. (2019). Overview and methodology Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf.
- ECOLEC. (2019). Economía circular: claves para entender el modelo que está revolucionando la sostenibilidad. Madrid, España: Ecolec Fundación. Recuperado de: <https://www.ecolec.es/informacion-y-recursos/economia-circular/>
- Ecoraee. (2013). Informe de resultados del ACV del proceso. Recuperado el 12 de julio de 2019, de <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACV.ProcesoCompleto.pdf>
- Ekvall, T. (2019). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. Recuperado el 29 de noviembre de 2019, de <https://www.intechopen.com/books/sustainability-assessment-at-the-21st-century/attributional-and-consequential-life-cycle-assessment>.

- Emmerson, R. H., Morse, G. K., Lester, J. N., & Edge, D. R. (1995). The Life-Cycle Analysis of Small Sewage-Treatment Processes. *Water and Environmental Journal*, 317-325.
- EPA. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and practice*. Recuperado el 10 de 04 de 2018, de:
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P100L86.D>
- Franklin Associates (1992). Prairie Village, Kansas. Análisis de la energía y del perfil medioambiental de los pañales para niños de un solo uso y de tela, grupo de fabricantes de pañales, American Paper Institute.
- García, Sammy (2014) Evaluación Ambiental durante el Ciclo de Vida de una Vivienda Unifamiliar. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Guggemos, A., & Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of infrastructure systems* 11, 93-101.
- Haya-Leiva, E. (2016). Análisis de Ciclo de Vida. Recuperado el 14 de setiembre de 2018, de <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.
- Hellweg S, Mila I Canals L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Nature* 344(6188):1109–1113.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation & Recycling*, 10967-77. doi:10.1016/j.resconrec.2016.02.009.

- Hossain, U; Chi Sun Poon; Lo, I; C. P. Cheng, J. (2017). Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. Recuperado el 23 de enero de 2019, de:
https://www.researchgate.net/publication/312100347_Comparative_LCA_on_using_waste_materials_in_the_cement_industry_A_Hong_Kong_case_study.
- INACAL. (2018). Instituto Nacional de Calidad. Obtenido de:
https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO6399.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2019). PERÚ: Evolución Mensual de la Actividad del Sector Construcción (PBI de Construcción): 2014 – 2019. Consulta 15 de diciembre de 2019, de:
http://www3.vivienda.gob.pe/Destacados/estadistica/62_PBI-CONSTRUCCION.pdf.
- IPCC. (2013). *CAMBIO CLIMÁTICO 2007: Informe de Síntesis*. Ginebra-Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- ISO. (1997). *ISO 14040:1997*. Recuperado el 14 de abril de 2018, de <https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf>.
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006*. Recuperado el 20 de abril de 2018, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>.
- Joglekar, S; Rhushikesh A.Kharkar; Sachin A.Mandavgane; Bhaskar D.Kulkarni. (2018). Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison between waste based bricks and burnt clay bricks. Recuperado el 18 de octubre de 2019, de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S22106707173157>.

- Kahhat, R., Crittenden, J., Sharif, F., Fonseca, E., Li K., S. A., & Zhang, P. (2009). Environmental impacts over the Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall Systems. *J. Infrastruct. Syst*, 211-221.
- KEOLIAN, Gregory, S. Blanchard, P Reppe. (2000). *Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house*. Journal of Industrial Ecology. Volumen 4, Número 2, pp. 135 -156.
- Khasreen, M.M., Banfill, P.G.G., Menzies, G.F. (2009).: Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 674–701.
- Knoeri, C; Sanyé-Mengual, E; Hans-Joerg Althaus. (2013). Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. Recuperado el 16 de Agosto de 2018, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0544-2>.
- Kugeler, K; Röhrlich, M; Mistry, M; Martens, P; Buntentbach, S; Ruhrberg, M; Dienhart, M; Briem, S; Quinkertz, R; Alkan, Z. (2000). A method to calculate the cumulative energy demand (CED) of lignite extraction. Recuperado el 04 de junio de 2018, de: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978675>.
- Larrea-Gallegos, G., I., Gallice, G, Vázquez-Rowe. (2017). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(7), 1109- 1124.
- Lee SJ, Hawkins TR, Ingwersen WW, Young DM (2014). Exploring the Use of Ecological Footprint in Life Cycle Impact Assessment Findings from a Comparison of Transportation Fuels. *Journal of Industrial ecology*, 19(3), 416–426.

- Ley General del Ambiente. (2005). Obtenido de Ministerio del ambiente: LEY N° 28611. Recuperado el 10 de noviembre de 2018, de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente>.
- Lindfors, L., & Hoffman, K. (1995). *Nordic Guidelines for Life Cycle Assessment*. Copenhagen, Dinamarca: Nordic Council of Ministers.
- Lozano, A. (2014). Análisis del ciclo de vida como instrumento de desarrollo de la ecología industrial: Aplicación al proceso de impresión de un periódico.
- Lozano-Miralles, J; Hermoso-Orzáez, M; Martínez-García, C; Rojas-Sola, J.I. (2018). Comparative Study on the Environmental Impact of Traditional Clay Bricks Mixed with Organic Waste Using Life Cycle Analysis. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2917>.
- Maza, F. (2012). "Análisis del ciclo de vida de materiales de construcción convencionales y alternativos." Recuperado el 16 de mayo de 2018, de <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/SS%20Arq%20Arista/%2012.pdf>.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú*. Lima. Recuperado el 5 de Junio de 2018, de <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20140423145035.pdf>.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Sexto informe nacional de residuos sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal del 2013*. Lima. Obtenido de <http://sinia.minam.gob.pe/documentos/cuarto-informe-nacional-residuos-solidos-municipales-no-municipales>.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Producción minera no metálica del Perú creció 79% en los últimos cinco años*. Recuperado el 5 de abril de 2018, de http://www.minem.gob.pe/_detallenoticia.php?idSector=1&idTitular=7440.

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2015). *¿Qué es la Etiqueta Ecológica Europea?* <https://www.miteco.gob.es/>. Recuperado 15 de abril de 2018, de: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/etiqueta-ecologica-de-la-union-europea/etiqueta-ecologica-europea/que_es.aspx.
- Moreno, E., Valsasina, L., Fitzgerald, D., Brunner, F., Vadenbo, C., Bauer, C., . . . Wernet, G. (2017). *Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.4*. Obtenido de: https://www.ecoinvent.org/files/change_report_v3_4_20171004_1.pdf.
- Moya, A., Montero M., Montilla M. (2010). INICIACIÓN EN MEDIO AMBIENTE. Córdoba: Imprenta Luque.
- PELCAN (2017a). Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de: <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/sobre-la-red-ciclo-devida/herramientas-de-gestion-empleadas/analisis-de-ciclo-de-vida-ambiental-acv-a/>.
- PELCAN (2017b). Estudio de análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto san jerónimo – cusco. Recuperado el 24 de setiembre de 2018, de https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2019/06/13_estudio_ladrillo.pdf.
- PRÉ CONSULTANTS. (2019). *SimaPro Database Manual: Methods Library*. Amsterdam, Holanda. Recuperado el 08 de febrero de 2019, de <https://simapro.com/wp-content/uploads/2019/02/DatabaseManualMethods.pdf>.
- Quispe, I.; Vázquez-Rowe, I.; Kahhat, R.; Arena, A. P.; Suppen-Reynaga, N. (2017). Special Issue: Life cycle assessment: a tool for innovation in Latin America Vol.22 No.4 pp.469-655. Recuperado el 25 de octubre de 2019, de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173150669>.

- Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2019). Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. *Journal of Cleaner Production* 209, 1235-1244.
- Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Tendencias tecnológicas*.
- Scharnhorst, Wolfram; Jolliet, Olivier; Hilty, L. (2006). Life cycle assessment of mobile telephone networks, with focus on the end-of-life phase. Recuperado el 13 de febrero de 2018, de: <https://infoscience.epfl.ch/record/62768>.
- SETAC. (1994). *Life Cycle Assessment: A new way of thinking*. Recuperado el 12 de 04 de 2018, de: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/etc.5620130601>.
- Stripple, H. (2001). Life Cycle Assessment of Road. IVL Swedish Environmental Research Institute, 1, 1-90.
- Torre, A. (2018). Diseño y análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz. En Lima Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- TRAMA, LUIS Y TROIANO, JUAN CARLOS. (2001). «Análisis del ciclo de vida según las normas de la subserie IRAM-ISO 14040», Construir, número 57, enero/febrero, ISBN 987-01-0174-7.
- Tucker, A., E. Haag, P. Eder, A. Vercauteren, Th. Wiedmann U. Tischner, M. Charter, I Belmane, G. Timmers, M. van der Vlugt (2000). Eco-design: European State of the Art. Part I and Part II. Part I: IPTS report EUR 19583 EN, IPTS, Seville, Spain (60 pp.). Part II: downloadable via www.jrc.es, 400 pp.

UNE. (2006). ISO 14025. Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos.

United Nations Population Fundation, UNFPA (2007). Estado de la población mundial 2007. Indicadores demográficos, sociales y económicos [en línea]. pp. 90-93 [Consulta 20 abril 2019]. Disponible en internet: http://www.unfpa.org/swp/2007/spanish/notes/indicators/s_indicator2.pdf .

United Nations Environment Programme, UNEP (2009). UNEP- Economics and Tarde Branch. Cities and Green Buildings: In the Transition to a Green Economy, a UNEP Brief [en línea]. [Consulta 8 mayo 2019]. Disponible en internet: <http://www.unep.ch/etb/ebulletin/pdf/Cities%20and%20building%20brief.pdf> .

UNEP Global Environmental Alert Service. (2014). Sand, rarer than one thinks. Recuperado el 21 de setiembre de 2018 de. http://www.unep.net/geas/archive/pdfs/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf.

Vallejo, A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Recuperado el 30 de marzo de 2018, de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6827#page=1>.

Vázquez-Rowe, I., Reyna, J., García-Torres, S., & Kahhat, R. (2015). Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? *Applied Energy* 159, 108-116.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat –Abedrabbo, R., Quispe –Trinidad, I. (2016a). Evaluación ambiental de productos agrícolas en el Perú a través de la metodología análisis de ciclo de vida “ECOAGRO”. Recuperado el 28 de Febrero de 2019, de: <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/proyecto/proyecto-ecoagro-financiado-por-empresa-valle-y-pampa-s-a/>.

- Vázquez-Rowe, I., Quispe –Trinidad, I., Torres- García, R. (2016b). Software para Cálculo de Huella de Carbono y Tasa de Retorno Energética para productos pesqueros en Perú “PescaEnVerde Perú”. Recuperado el 14 de abril de 2019, de <https://red.pucp.edu.pe/cicludevida/proyecto/proyecto-pescaenverde-peru/>.
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2018). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation & Recycling* 142, 283-292.
- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., & Sánchez, I. (2019). Perú LCA: launching the Peruvian national life cycle database. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 2089–2090.
- Verán, D. (2017). Evaluación ambiental de un tramo específico de la autopista panamericana sur, usando la metodología de análisis de ciclo de vida En Lima Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Verán-Leigh, D; Vázquez-Rowe, I. (2019). Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: a policy support perspective LCA FOR ENERGY SYSTEMS AND FOOD PRODUCTS. Recuperado el 18 de diciembre de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-018-01579-2>.
- Yazdanbakhsh, A; Lawrence C. Bank, Thomas Baez y Ildo Wernick. (2018). Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-017-1360-5>.

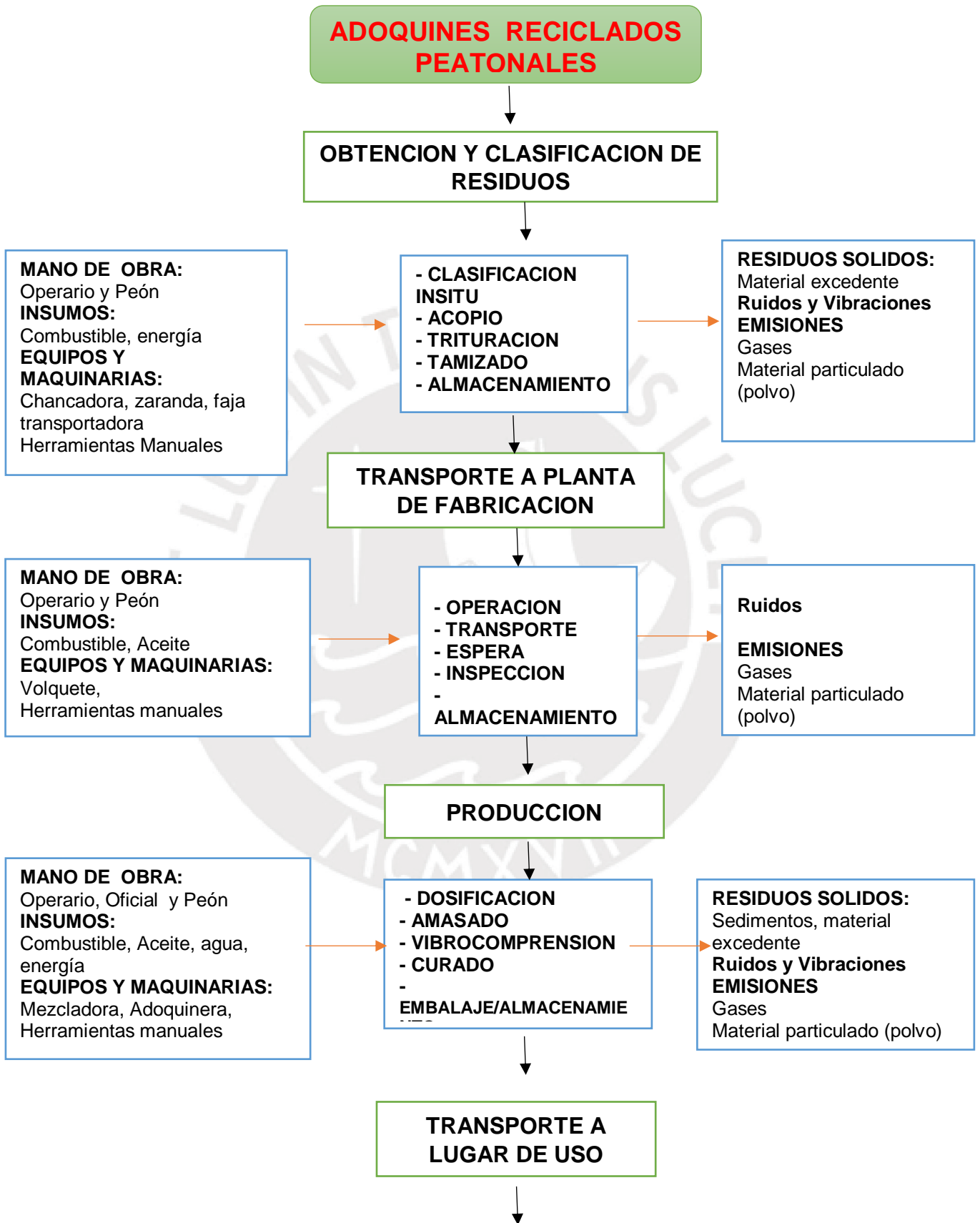
Zapata, P., and Gambatese, J. A. (2005). "Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction." *J. Infrastruct. Syst.*, 11(1).

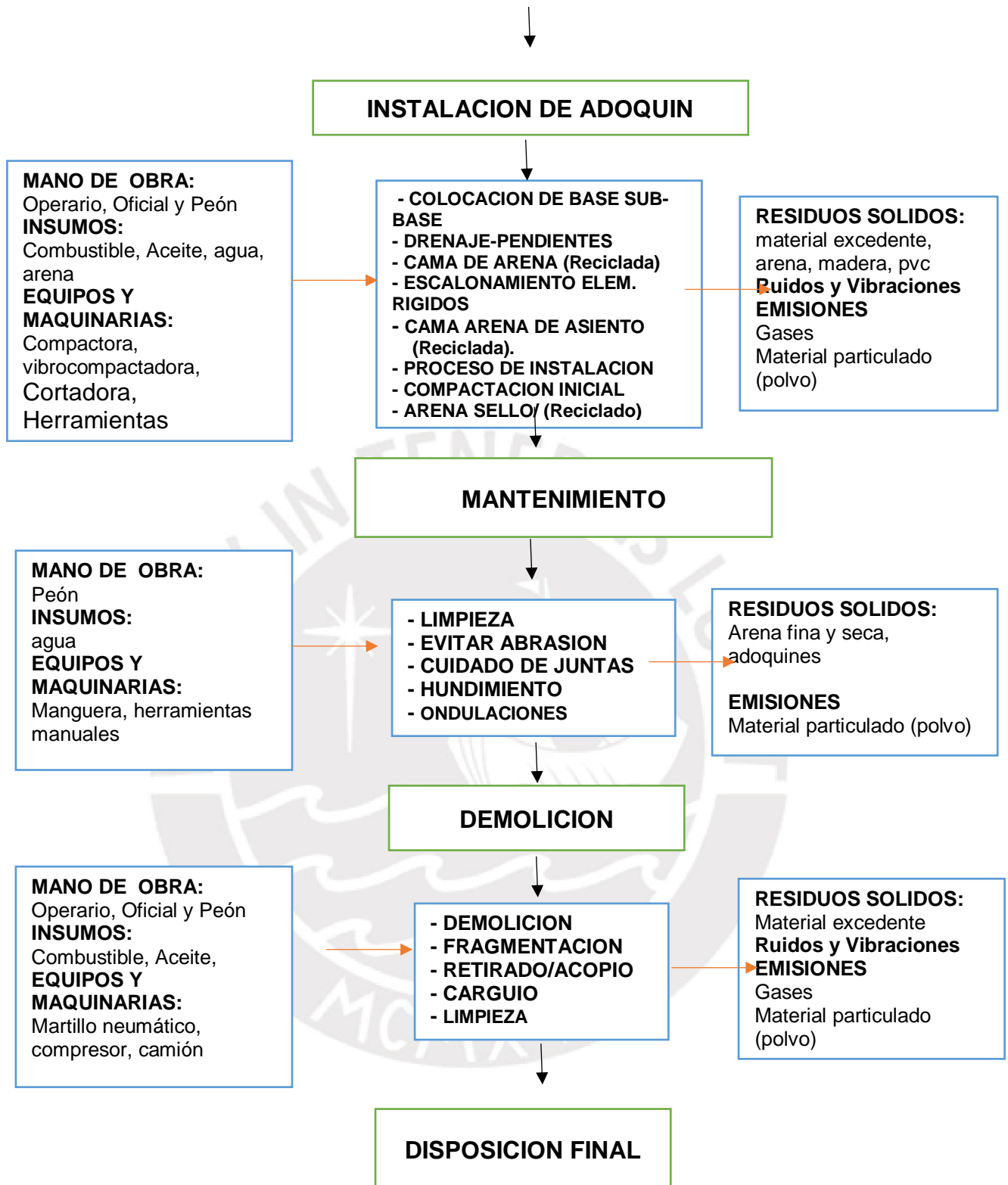
Zortea, R; Rejane Rigon, M; Mendes Moraes, C; Espinosa Modolo, R. (2019). Suggestion of Life Cycle Impact Assessment Methodology: Selection Criteria for Environmental Impact Categories. Recuperado el 25 de diciembre de 2019, de <https://www.intechopen.com/books/new-frontiers-on-life-cycle-assessment-theory-and-application/suggestion-of-life-cycle-impact-assessment-methodology-selection-criteria-for-environmental-impact-c>.



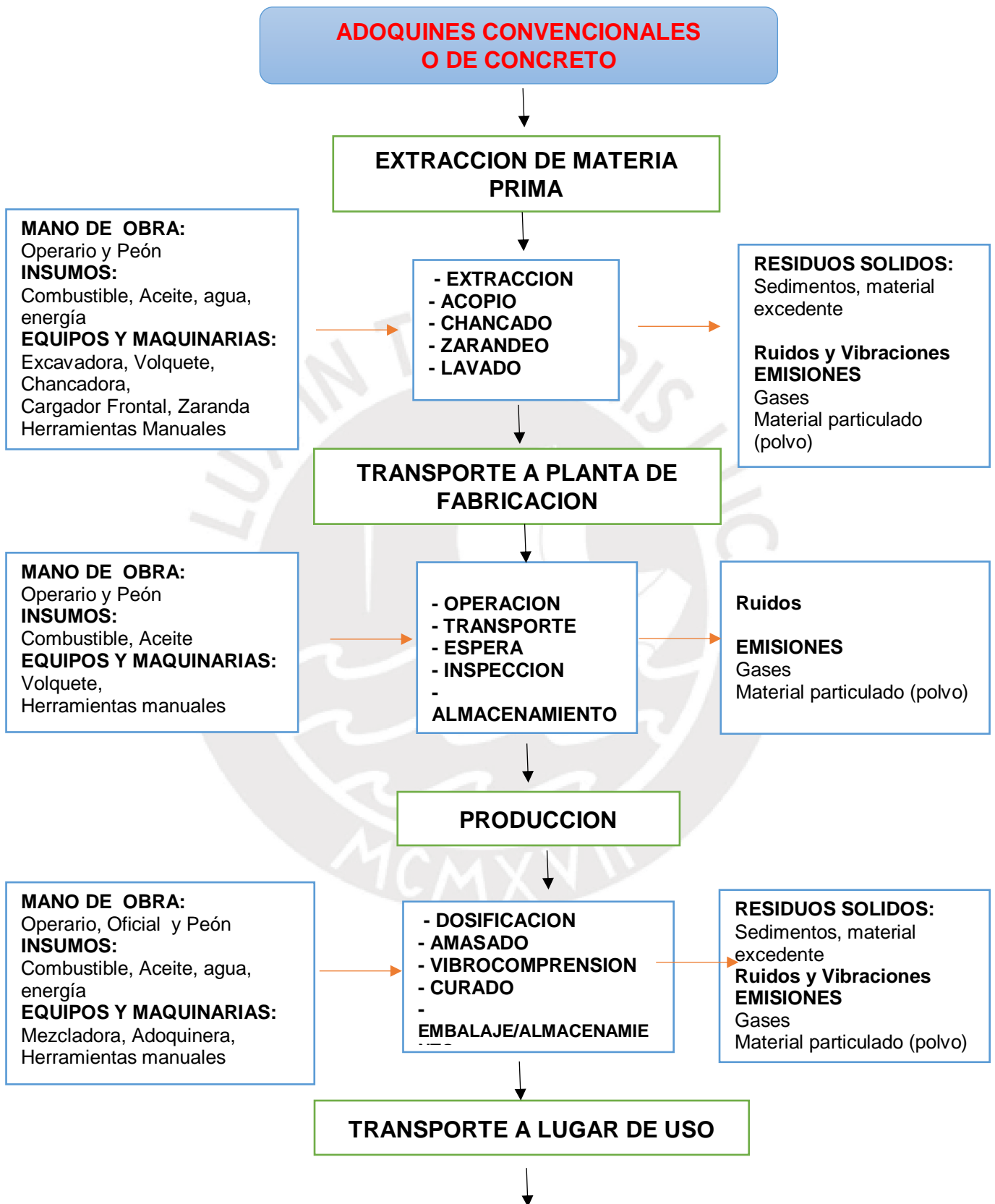


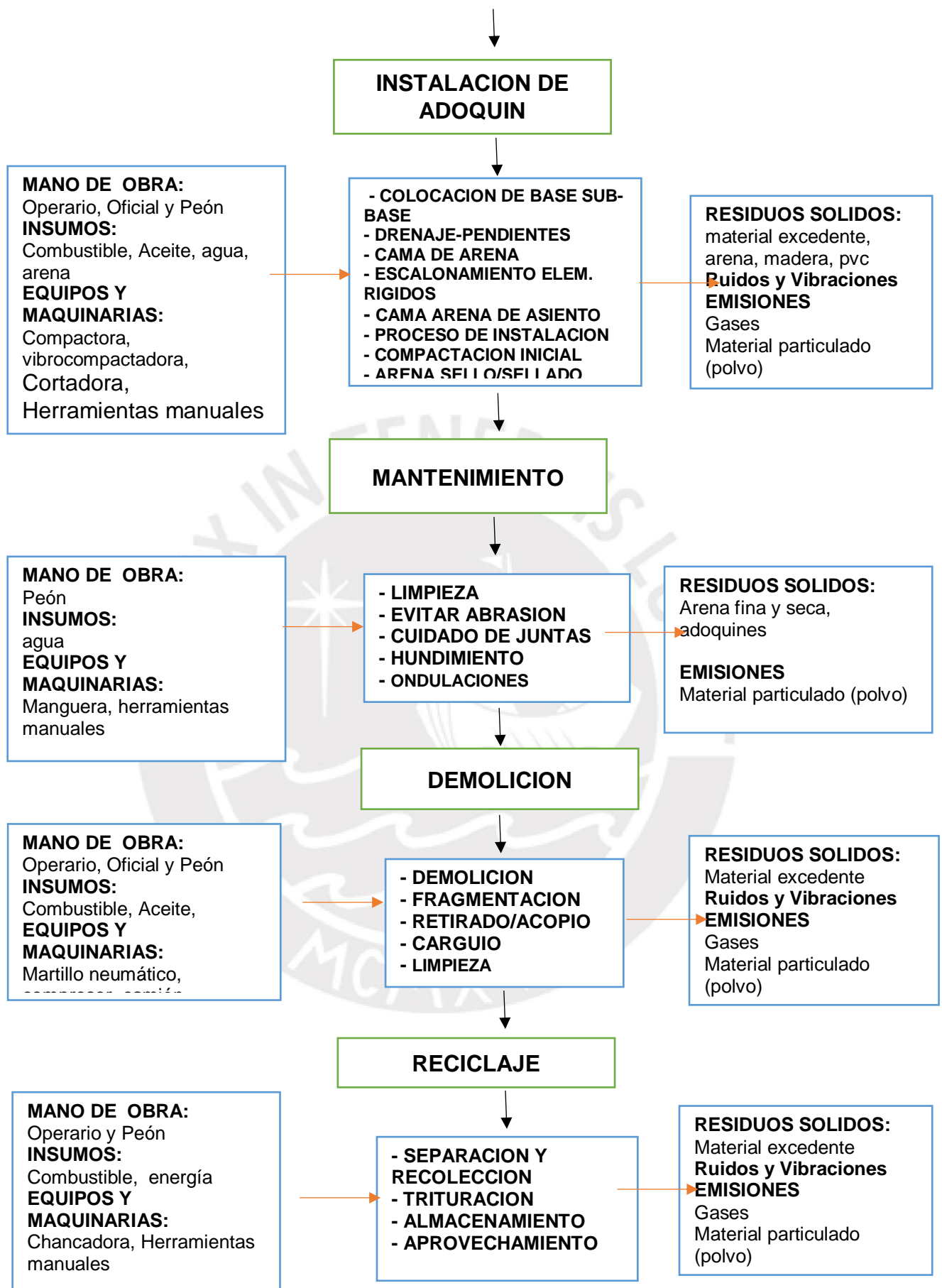
ANEXO A: Preparación para la recolección de datos para el adoquín CICLO antes de la visita al campo.





ANEXO B: Preparación para la recolección de datos para el adoquín Convencional antes de la visita al campo.





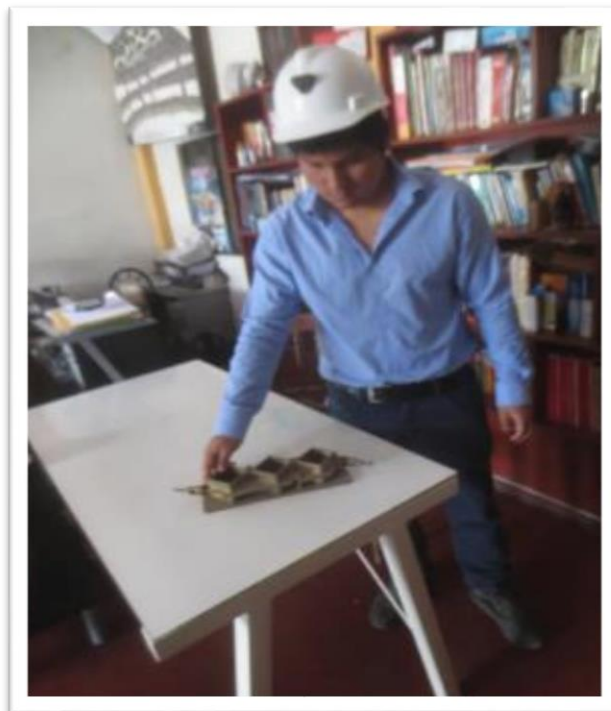
ANEXO C: PANEL FOTOGRÁFICO.



Fotografía 1: CANTERA FLUVIAL DEL RÍO HUALLAGA EN LA LOCALIDAD DE CHULLQUI-HUÁNUCO



Fotografía 2: MOLDE PARA EL ENSAYO A COMPRESIÓN DEL ADOQUÍN DE CONCRETO.



Fotografía 3: PREPARACIÓN DEL MOLDE ANTES DEL ENSAYO.



Fotografía 3: ENSAYO DE COMPRESIÓN DEL ADOQUÍN CONVENCIONAL