

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**“ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS
EN LIMA (PERÚ)”**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

VANIA VANESSA CALLE CABRERA

ASESOR:

RAMZY FRANCIS KAHHAT ABEDRABBO, Ph.D

Lima, Agosto del 2019

RESUMEN

En Lima, actualmente se observa una tendencia al alza de la construcción de edificios de oficinas debido al incremento de la inversión privada en el país. A pesar del impacto positivo que posee la industria de la construcción en la economía, los edificios son responsables de una demanda energética considerable y la emisión de sustancias contaminantes al ambiente desde su construcción hasta su demolición. Por eso, tomando en cuenta la importancia de su presencia y la falta de estudios que analicen todas sus etapas, se optó por emplear la metodología de Análisis del ciclo de vida (ACV) según la ISO 14040 e ISO 14044. El objetivo principal del estudio fue identificar la etapa más relevante en el ciclo de vida de un edificio de oficinas ubicado en la ciudad de Lima (Perú) con el fin de contribuir con información sobre la huella ambiental de este tipo de edificaciones. Las etapas consideradas fueron el pre-uso (manufactura y construcción), el uso (operación y mantenimiento) y el fin de vida (demolición y transporte de escombros). El software SimaPro y la base de datos Ecoinvent fueron empleados en conjunto con las metodologías TRACI 2.1 y Cumulative energy demand 1.10.

Los resultados mostraron que la etapa de uso es la más importante en cuanto a energía primaria, porque demandó el 85% del total debido principalmente a la demanda eléctrica durante la operación del edificio. Por otro lado, la etapa de pre-uso destacó en seis de las diez categorías de impacto analizadas y demandó el 15% de la energía primaria como consecuencia de la manufactura de materiales como el acero de refuerzo, el concreto premezclado y el vidrio. Por último, las etapas de construcción, mantenimiento y fin de vida no resultaron tan considerables como las anteriores, aunque si destacaron por el uso de combustibles fósiles para el transporte. El estudio también encontró que existen algunas variaciones con respecto a edificios de oficinas de otras partes del mundo y que la importancia de las etapas del ciclo de vida varía en comparación con un edificio residencial ubicado también en Lima. El tiempo de vida útil, las fuentes de generación eléctrica, el equipamiento y el contexto climático del lugar donde está situado el edificio fueron los factores que influyeron más durante la operación del edificio. Por otra parte, la tecnología para la fabricación de los materiales, el tamaño del edificio, el tipo de sistema estructural y la sismicidad de cada país tuvieron un rol importante en la manufactura.

Agradecimientos

A mi familia y amigos, quienes me apoyan siempre, y a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. A mi asesor Ramzy Kahhat, por su guía a lo largo de todos estos años y la confianza brindada.

Dedicatoria

A Pía, Cecilia y Jesús, las personas más importantes de mi vida. Gracias por sus consejos y motivación.



ÍNDICE

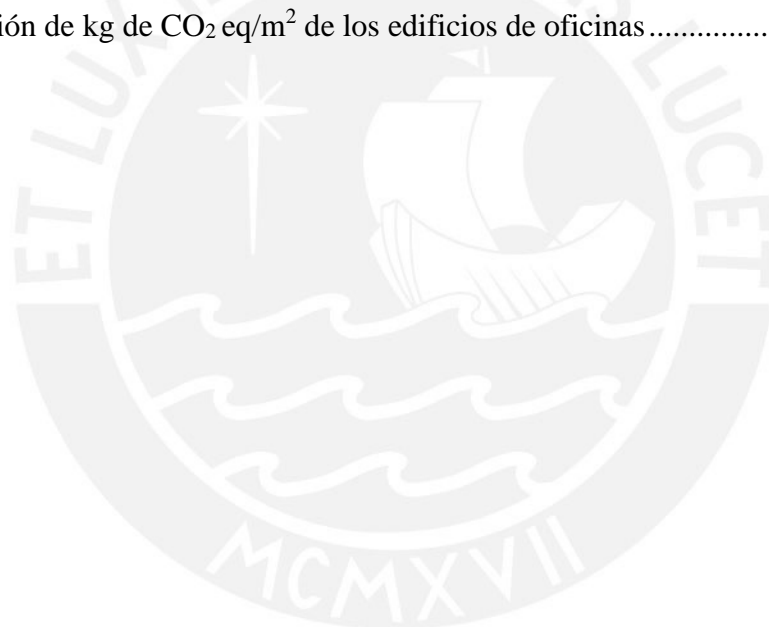
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos generales y específicos	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1. Origen del ACV como herramienta ambiental	4
2.2. ACV de edificios de oficinas en el mundo	5
2.3. Historia del ACV en Latinoamérica	9
2.4. ACV de edificios en Latinoamérica	10
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DEL ACV	13
3.1. Definición de ACV	13
3.2. Etapas del ACV	14
3.3. Procedimiento para el uso de SimaPro	24
CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO	28
4.1. Descripción del objeto en estudio.....	28
4.2. Límites del sistema en estudio	29
4.3. Inventario del sistema	30
4.3.1. Procesos incluidos en el sistema	36
4.4. Análisis de sensibilidad	39
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	40
5.1. Consumo energético del edificio	40
5.2. Impactos ambientales del edificio	41
5.3. Análisis de sensibilidad del tiempo de vida útil	44
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	47
6.1. Comparación con edificios residenciales ubicados en Lima	47
6.2. Comparación con edificios de oficinas de otros países	50
6.3. Posibles medidas de mitigación	55
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribución del consumo de energía según el sector económico en el Perú.....	1
Figura 3.1: Etapas del ACV	14
Figura 3.2: Conjunto de procesos unitarios	16
Figura 3.3: Ejemplo del sistema de un producto.....	16
Figura 3.4: Elementos obligatorios y opcionales de la etapa de evaluación de impactos	19
Figura 3.5: Pasos seguidos para el uso del software SimaPro	24
Figura 3.6: Creación del proceso unitario.....	25
Figura 3.7: Creación de montajes	26
Figura 3.8: Asignación de metrados	26
Figura 3.9: Comparación gráfica de los impactos ambientales dos procesos.....	27
Figura 3.10: Datos de los impactos ambientales de dos procesos	27
Figura 4.1: Plano de ubicación del edificio empresarial.....	28
Figura 4.2: Plano de elevación del edificio empresarial	29
Figura 4.3: Límites del sistema en estudio.....	30
Figura 4.4: Procesos incluidos todas las etapas del ciclo de vida.....	31
Figura 4.4: Fuentes de generación eléctrica en el Perú del año 2014.....	33
Figura 4.5: Consumo eléctrico en 10^3 kWh del edificio de oficinas	34
Figura 4.6: Distancia del edificio de oficinas (A) respecto al relleno autorizado (B)	36
Figura 5.1: Distribución del consumo de energía primaria según las etapas del ciclo de vida.....	41
Figura 5.2: Distribución de las categorías de impacto según las etapas del ciclo de vida.....	43
Figura 5.3 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 1 (50 años)	45
Figura 5.4 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 2 (30 años)	46
Figura 5.5 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 3 (80 años)	46
Figura 6.1: Comparación del consumo de energía primaria en GJ/m^2 de los edificios ubicados en Lima	47
Figura 6.2: Comparación de la emisión de kg de CO_2 eq/ m^2 de los edificios ubicados en Lima	49
Figura 6.3: Comparación del consumo energético en GJ/m^2 de los edificios de oficinas	52
Figura 6.4: Comparación de la emisión de kg de CO_2 eq/ m^2 de los edificios de oficinas	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Categorías de impacto de la herramienta TRACI.....	22
Tabla 3.2: Tipos de fuentes energéticas de la herramienta CED	23
Tabla 4.1: Datos del consumo eléctrico del edificio de oficinas. Unidades en 10^3 kWh	34
Tabla 4.2: Ratios para la estimación del volumen de escombros generados durante la demolición de un edificio expresados en m^3/m^2	35
Tabla 4.3: Procesos incluidos en el inventario.....	37
Tabla 4.4: Vida útil y tasa lineal de depreciación de edificios públicos.....	39
Tabla 5.1: Consumo de energía primaria en GJ para cada etapa del ciclo de vida.....	40
Tabla 5.2: Impactos ambientales para cada etapa del ciclo de vida.....	43
Tabla 6.1: Consumo energético en GJ/ m^2 de los edificios de oficinas.....	52
Tabla 6.2: Emisión de kg de CO_2 eq/ m^2 de los edificios de oficinas.....	54



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los edificios constituyen parte fundamental de una ciudad porque son necesarios para el desarrollo de distintas actividades. No obstante, los impactos ambientales que estos generan no siempre son tomados en cuenta por los encargados de su diseño y construcción (Kofoworola & Gheewala, 2008). A los edificios y al sector construcción se les atribuye el 39% de las emisiones de CO₂, así como el consumo del 36% del uso final de la energía mundial (IEA & UNEP, 2018). Al ser el Perú un país en vías de desarrollo, se espera que el consumo de energía aumente y Lima, la capital peruana, concentra la mayor parte de los edificios construidos en el país. Tal como se puede ver en la Figura 1.1, en el año 2016 el sector residencial, comercial y público del Perú consumió el 26% de la energía total del país (MINEM, 2018).

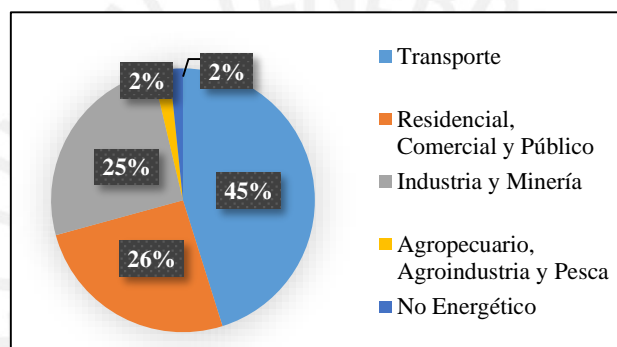


Figura 1.1: Distribución del consumo de energía según el sector económico en el Perú
Fuente: MINEM (2018)

La estructura de los edificios en Lima está compuesta principalmente por concreto, el cual es un material altamente contaminante por la producción de cemento. Este es responsable de la emisión de aproximadamente el 8% de los gases de efecto invernadero del país (NAMA, 2016). A pesar de sus impactos perjudiciales al ambiente, este material es importante para la economía nacional. El consumo interno de cemento influye directamente en el desempeño del sector construcción y es un indicador para medir el desarrollo económico y social del país (CAPECO, 2019). Por ello, resulta fundamental contrarrestar sus impactos negativos mediante la implementación de mejoras en su producción. Perú se encuentra en una zona altamente sísmica, por lo que no se espera que disminuya el uso del concreto armado como material de construcción (Vázquez-Rowe et al., 2019).

Todo esto demuestra la importancia de lograr la eficiencia energética y reducir la huella ambiental del sector construcción en el país. Si bien el número de edificios residenciales y comerciales está en aumento, aún no existe una norma que regularice su huella ambiental. Las

iniciativas que se han creado en el Perú son de carácter opcional. Estas incluyen el programa Mivivienda verde (Fondo MiVivienda, 2019), la creación del Código de construcción sostenible (El Peruano, 2015) y la certificación mediante sistemas internacionales. Los edificios generan impactos ambientales durante todas sus etapas, las cuales incluyen la manufactura de los materiales, la construcción, la operación, el mantenimiento y la demolición. Por ello, para lograr su sostenibilidad es necesario realizar estudios holísticos que permitan identificar los elementos que tienen una mayor incidencia respecto a todo el ciclo de vida (UNEP, 2003).

Una herramienta holística muy difundida es el análisis del ciclo de vida (ACV) normada por la ISO 14040 e ISO 14044. A pesar de que cada edificio es un producto único y por lo tanto la aplicación del ACV es más compleja, esta herramienta ha sido empleada para comparar y elegir los materiales que son más amigables con el ambiente, mejorar los procesos constructivos (Singh et al., 2011) y disminuir los impactos ambientales asociados a las etapas de operación, mantenimiento y fin de vida (Bawden & Williams, 2015). Los edificios comerciales como las oficinas requieren especial atención, porque tienen un mayor impacto ambiental que los edificios residenciales (Sharma et al., 2011). Sin embargo, el análisis de este tipo de edificios ha estado rezagado en comparación con los edificios residenciales. Algunos estudios que han aplicado esta herramienta en oficinas han sido realizados en países como Estados Unidos (Junnila et al., 2006; Scheuer et al. 2003), Finlandia (Junnila, 2004), México (Centro Mario Molina, 2014) y China (Huijun et al., 2012).

Lamentablemente, en el Perú no se han realizado estudios de este tipo, porque las investigaciones han estado enfocadas en viviendas unifamiliares, multifamiliares, proyectos de infraestructura y otros relacionados al sector industrial. Por ello, esta investigación se enfoca en la realización del ACV de un edificio de oficinas ubicado en Lima. El estudio tiene como finalidad analizar el consumo de energía primaria y los impactos ambientales del edificio con el fin de identificar la etapa más importante. Asimismo, busca identificar las principales diferencias con edificios de oficinas de otros países y con edificios residenciales ubicados en la misma ciudad. De esta manera se busca promover el pensamiento de ciclo de vida en el sector construcción del Perú y contribuir con información acerca del impacto ambiental de este tipo de edificaciones.

1.1. Hipótesis

Se pretende demostrar que la etapa de uso de un edificio de oficinas ubicado en Lima tiene una mayor demanda energética que el resto de sus etapas debido al requerimiento de energía eléctrica durante sus 50 años de operación. Además, que la etapa de pre-uso genera la mayor cantidad de impactos ambientales debido a la manufactura de materiales altamente contaminantes como el concreto.

1.2. Objetivos generales y específicos

a. Objetivo general:

Cuantificar y evaluar los impactos ambientales de un edificio de oficinas ubicado en la ciudad de Lima (Perú) mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

b. Objetivos específicos:

- Identificar las etapas del ciclo de vida de un edificio de oficinas ubicado en Lima y definir la frontera del sistema en estudio.
- Desarrollar el inventario del ciclo de vida del edificio de oficinas utilizando información primaria (planos y especificaciones del proyecto) y secundaria (base de datos Ecoinvent).
- Aplicar la metodología del ACV, mediante el uso del software SimaPro, para evaluar los impactos ambientales del edificio de oficinas.
- Identificar los procesos que generan mayor impacto ambiental durante el ciclo de vida de la edificación.
- Comparar los resultados con edificios de oficinas de otros países y con edificios residenciales ubicados también en Lima. Además, identificar la influencia del tiempo de vida útil en el ciclo de vida de la edificación mediante un análisis de sensibilidad.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Origen del ACV como herramienta ambiental

El origen del ACV inicia en la década de los sesentas por la preocupación del uso eficaz de las materias primas y los recursos para la generación de energía a raíz del aumento de la población mundial (EPA, 2006). Harold Smith se convirtió en un pionero de ese campo luego de que en 1963 incluyera el término “cumulative energy” durante una la Conferencia mundial de energía para presentar los resultados de un estudio sobre la demanda energética de unos productos químicos (AGA, 2010). Posteriormente, a finales de los años sesenta se llevó a cabo una investigación en EEUU a cargo del Midwest Reserch Institute (MRI) para comparar no solo el consumo de energía, sino también los requerimientos de materias primas y las emisiones al ambiente generadas durante la fabricación de distintos tipos de envases para gaseosas. El MRI denominó como Análisis del Perfil Ambiental y de Recursos (REPA por sus siglas en inglés) a los estudios que cuantificaran los recursos y las emisiones generadas por la fabricación de productos (EPA, 2006). La crisis de petróleo que surgió en los años setenta, motivó la realización de otros REPA. Uno de ellos fue el encargado a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) para analizar también envases de bebidas (EPA, 1974).

Pasada la crisis, el interés fue creciendo hacia la disposición de los residuos sólidos. Esto generó que iniciara nuevamente la investigación en la fabricación de productos con un concepto de ciclo de vida y es así que el ACV siguió desarrollándose aunque aún no existía un consenso global sobre su metodología (EPA, 2006). Finalmente, en 1990 la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC por sus siglas en inglés) organizó un taller en EEUU, en el cual estuvieron presentes profesionales de diferentes países con el fin de mejorar la metodología del ACV (EPA, 1993). Allí se estableció por primera vez el nombre de “Análisis de ciclo de vida” y sus componentes tales como el inventario, el análisis de impactos y la identificación de oportunidades para disminuir los impactos. Asimismo, otros talleres que propiciaron las bases de la metodología del ACV fueron realizados en 1991, 1992 y 1993 por la SETAC y sus representantes de Europa en donde se resumieron los lineamientos del ACV en el “Código de Práctica” (SETAC, 1994).

Lamentablemente, en los años siguientes el ACV aún no estaba estandarizado y fue mal empleado por algunas empresas que usaban la herramienta como marketing para sus productos. Como consecuencia, el comité de gestión ambiental de la Organización Internacional de

Normalización (ISO por sus siglas en inglés) publicó en 1997 la ISO 14040 titulada “Environmental management-life cycle assessment-principles and framework” con el fin de estandarizar la herramienta. El ACV fue definido como una técnica de gestión ambiental para asesorar los impactos potenciales asociados a un producto. Sus partes fueron redactadas en las ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 (ISO, 1997).

Más adelante, en el año 2002, se formó la “Iniciativa Global de Ciclo de Vida” a partir de la unión de SETAC y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) con el fin de promover el pensamiento de ciclo de vida a nivel mundial (Life Cycle Initiative, 2017). A raíz de ello, el ACV empezó a ser empleada para distintos tipos de productos y fue incluido en políticas medioambientales de algunos países. En Europa, el pensamiento de ciclo de vida fue incluido en el 2003 dentro de su política de producto integrada como uno de sus principios claves (IPP, 2003). Con el tiempo se fueron creando más asociaciones alrededor del mundo que promueven el uso del ACV. Finalmente, en el 2006 se publicó la última edición de la norma, en la cual las ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 fueron reemplazadas por una sola norma ISO 14044. Actualmente, las normas que rigen la metodología del ACV son la ISO 14040 que contiene los principios y el marco de referencia y la ISO 14044 que posee los requisitos y las directrices (ISO, 2006).

2.2. ACV de edificios de oficinas en el mundo

Si bien el ACV es una herramienta medioambiental ampliamente usada en productos del sector industrial, su uso en edificaciones resulta más complejo por la alta variabilidad de la industria constructiva y la falta de una metodología detallada para este tipo de aplicaciones (UNEP, 2003). Debido a que durante la etapa de uso los edificios comerciales tienen un mayor impacto ambiental que los residenciales (Cihat Onar, Kucukvar, & Tatari, 2014), esta investigación se enfocó en ese tipo de edificios, específicamente en uno de oficinas. En el Perú no se han realizado estudios que analicen todo el ciclo de vida de edificios empresariales, sin embargo, en otras partes del mundo si se han hecho este tipo de investigaciones.

Junnila (2004) cuantificó y comparó los impactos ambientales causados por tres edificios de oficinas ubicados en Finlandia. Asimismo, identificó las etapas del ciclo de vida y los elementos que contribuyeron más a las categorías de impacto analizadas. Las etapas del ciclo de vida incluyeron la extracción y el procesamiento de materias primas, la fabricación de los materiales de construcción, la operación, el mantenimiento y la demolición del edificio. En los tres edificios, la etapa de operación fue la más importante en las categorías de cambio climático,

acidificación y eutrofización. Los elementos que contribuyeron más a los impactos ambientales fueron el consumo de electricidad en los baños, el sistema HVAC y la iluminación. Además, las categorías de formación de smog y metales pesados fueron mayores durante la manufactura y el mantenimiento (Junnila, 2004). Posteriormente, Junnila et al. (2006) compararon uno de los edificios finlandeses analizado previamente con un edificio de oficinas ubicado en Estados Unidos. Las etapas del ciclo de vida consideradas fueron las mismas y la etapa de operación también fue la más resaltante. Esta demandó más del 80% de la energía total en ambos casos y dominó todas las categorías ambientales excepto la emisión de partículas PM₁₀, la cual fue mayor en las etapas de manufactura y mantenimiento. El consumo de energía y las emisiones del edificio finlandés fueron menores que en el edificio estadounidense, lo cual se explicó con las diferencias en la matriz para la generación eléctrica (Junnila et al., 2006).

Scheuer y colegas (2003) analizaron un edificio universitario ubicado en Estados Unidos que poseía un sistema estructural de acero. Este tenía espacios destinados a servir como oficinas, aulas y dormitorios. A diferencia de los estudios anteriores, en este caso la etapa de operación tuvo una duración de 75 años y dominó ampliamente la demanda de energía con 98%, así como las categorías de potencial de calentamiento global, pérdida de la capa de ozono, nitrificación, acidificación y generación de desechos. La segunda etapa más importante fue la manufactura de materiales que destacó principalmente en la generación de desechos, la pérdida de la capa de ozono y fue responsable de la demanda del 2% de la energía total. El estudio resaltó que durante el diseño de las edificaciones se debería hacer énfasis en la etapa de operación para mejorar su eficiencia. Asimismo, se deberían elegir materiales con un tiempo de vida más largo para disminuir los impactos generados por su reemplazo a lo largo del tiempo. La categoría de potencial de calentamiento global estuvo relacionada con el uso de combustibles fósiles para la generación eléctrica. Por ello, se planteó como recomendación la implementación de tecnologías más limpias para la generación de energía en los edificios (Scheuer et al., 2003).

Guggemos y Horvath (2005) compararon las diferencias en las etapas del ciclo de vida de un edificio de concreto armado con otro de acero con énfasis en el efecto de la etapa de construcción. En esa etapa se encontró que el edificio de concreto armado demandó más energía y generó mayores emisiones de CO₂ debido a que el uso del transporte, el requerimiento de materiales temporales como el encofrado y el tiempo de instalación fueron mayores (Guggemos & Horvath, 2005). Por otra parte, el edificio con el sistema estructural de acero demandó más energía durante su manufactura, lo cual compensó el impacto ambiental causado por el edificio de concreto en las etapas de construcción y fin de vida. Por ello, el estudio

concluyó que al analizar todo el ciclo de vida, no existe una diferencia notable respecto al uso de concreto o acero como material predominante en la estructura de un edificio (Guggemos & Horvath, 2005).

En Tailandia se desarrolló el ACV híbrido de un edificio empresarial y los resultados demostraron que la etapa de operación fue responsable de más del 50% de la emisión de gases de efecto invernadero causado por el uso de electricidad para la iluminación, el aire acondicionado y los equipos de oficina (Kofoworola & Gheewala, 2008). Las emisiones estuvieron relacionadas principalmente al uso de combustibles fósiles, porque estos fueron la principal fuente de generación eléctrica del país. El sistema de aire acondicionado demandó la mayor cantidad de energía durante la etapa de operación. Por ello, una recomendación consistió en el incremento de la temperatura (set point) de los equipos del sistema de aire acondicionado, lo cual demostró ser una fuente considerable de ahorro de energía. Por cada 1°C que se aumentó, el consumo energético disminuyó en 7% (Kofoworola & Gheewala, 2008).

Huijun et al. (2012) cuantificaron la energía consumida y la emisión de CO₂ de un edificio conformado por oficinas y aulas ubicado dentro de una universidad en China. Las etapas consideradas fueron la producción de materiales, la construcción, la operación y la demolición. La operación del edificio demandó la mayor cantidad de energía y fue el principal generador de CO₂ como consecuencia del uso de electricidad para el sistema HVAC y el suministro de agua. En la etapa de manufactura, la fabricación de concreto fue responsable de casi el 50% de las emisiones de CO₂, mientras que en la etapa de demolición el uso del vertedero para el tratamiento de los escombros fue lo más resaltante. La etapa de construcción fue la menos relevante de todas y su impacto se debió al uso de diésel para el transporte de materiales (Huijun et al., 2012). Algunas recomendaciones planteadas por Huijun et al. (2012) para disminuir la demanda eléctrica durante la etapa de operación consistieron en aumentar la temperatura del sistema de aire acondicionado (set point), así como apagar la luz y el aire acondicionado durante la hora de almuerzo. También se planteó el mayor uso de fuentes renovables para la generación de electricidad y la fiscalización de las fábricas para que la producción de materiales de construcción emplee tecnologías más avanzadas y contamine menos (Huijun et al, 2012).

En Canadá se realizó el ACV de un edificio de oficinas, en el cual se analizaron varias categorías de impacto para comparar los materiales empleados originalmente en la estructura del edificio con otras alternativas. Los resultados demostraron que el uso de muros de concreto prefabricado y los muros vaciados en obra fueron los que generaron un menor consumo energético, potencial de calentamiento global, contaminación del aire y contaminación del

agua. Además, el estudio resaltó la importancia de que los encargados de los proyectos tomen en cuenta el impacto ambiental y no solo la rapidez de los procesos constructivos a la hora de elegir los materiales de construcción (Ganjidoost & Alkass, 2012).

Subhi (2016) comparó ocho tipos de estructuras y revestimientos para un edificio de oficinas de dos pisos ubicado en la ciudad de Nueva York (Estados Unidos). La conclusión más relevante del estudio fue que para elegir la estructura con el mejor desempeño ambiental se deben analizar todas las etapas del ciclo de vida de un edificio (manufactura, construcción, mantenimiento, operación y fin de vida). Algunas alternativas tuvieron un menor impacto ambiental en las etapas de manufactura y construcción, pero obtuvieron el resultado contrario en la etapa de operación. De todas las alternativas estudiadas, el edificio construido a base de concreto prefabricado tuvo el menor consumo de energía, potencial de calentamiento global, y menores emisiones al aire, agua y suelo. Por otro lado, los edificios que poseían un muro cortina, independientemente del tipo de estructura (concreto o acero), fueron las que demandaron mayor energía y generaron la mayor cantidad de emisiones al ambiente (Subhi, 2016).

Lessard et al. (2018) realizaron el ACV en un edificio de oficinas que poseía la certificación LEED y lo comparó con otras seis versiones del mismo edificio en las que cambió el material de la estructura y el revestimiento. El estudio encontró que en una región como Quebec (Canadá) donde más del 90% de la energía eléctrica proviene de fuentes renovables, la demanda de energía y los impactos ambientales provenientes de la producción de materiales resulta mayor que el consumo energético durante la etapa de uso del edificio. Sin embargo, el puntaje que otorgó LEED a los materiales no reflejó esa importancia, porque la certificación está más enfocada a reducir la huella ambiental de la etapa de operación. Por ello, en el futuro se deberían implementar mejoras en los sistemas de certificación para que se adapten a las condiciones de cada región (Lessard et al., 2018).

Ylmén et al. (2019) compararon las etapas de producción de materiales, transporte, operación, mantenimiento y el fin de vida de un edificio de oficinas en Suecia. En este estudio la información sobre los materiales de construcción incluidos en el inventario fue obtenida directamente de los contratistas que participaron en el proyecto, lo cual disminuyó la incertidumbre de la información empleada. Al igual que en estudios anteriores, la etapa de operación y la producción de materiales fueron las etapas más resaltantes en la categoría de potencial de calentamiento global. Además, el estudio destacó la importancia de incluir la

fabricación de los equipos del sistema HVAC, porque tuvieron una contribución importante en el ciclo de vida del edificio (Ylmén, Peñaloza, & Mjörnell , 2019).

2.3. Historia del ACV en Latinoamérica

En Latinoamérica, el pensamiento de ciclo de vida no posee la misma difusión que en los países europeos o norteamericanos. Sin embargo, se han creado iniciativas que cuentan con el respaldo de la Iniciativa global de ciclo de vida y tienen como fin promover el uso del ACV como herramienta ambiental.

La Asociación Latinoamericana para la Evaluación del Ciclo de Vida (ALCALA por sus siglas en inglés) fue creada en el año 2003 con el objetivo de organizar una conferencia sobre ACV en la región latinoamericana. Sin embargo, esto recién se concretó en el año 2005 con la primera Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica (CILCA) realizada en Costa Rica, la cual consolidó la creación de ALCALA. La Red Iberoamericana de Ciclo de Vida y la Iniciativa de Ciclo de Vida de la UNEP/ SETAC mantienen relaciones estrechas con esta asociación y dentro de sus actividades principales está la organización del CILCA cada dos años (ALCALA, 2017). Adicionalmente, países como Perú, Colombia, Chile, Argentina, Brasil y México han creado sus propias asociaciones y representan a sus países en estas conferencias.

En el año 2005 también fue creada la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), la cual surgió como un grupo de investigación dentro de la Pontificia Universidad Católica del Perú y responde a la Iniciativa de Ciclo de Vida de la UNEP/SETAC. Uno de sus principales objetivos es compartir experiencias con redes nacionales e internacionales para difundir el ACV. Actualmente, realiza capacitaciones, representa al Perú en eventos internacionales y contribuye con la publicación de artículos científicos. Algunas publicaciones de PELCAN incluyen la presentación de una base de datos peruana (Vázquez-Rowe, Kahhat, & Sánchez, 2019), el estudio de la producción de cemento en Perú (Vázquez-Rowe et al., 2019), el estudio del uso de la cáscara de arroz como fuente de energía (Quispe , Navia, & Kahhat, 2019) y la comparación de la matriz eléctrica peruana con la española (Vázquez-Rowe et al., 2015).

En el sector público, el Ministerio del Ambiente de Perú creado en el año 2008 es la entidad encargada de velar por el cumplimiento de los principios que establece la Ley General del Ambiente (Ley 28611). En el artículo 75, esta se refiere al concepto de ciclo de vida para el manejo de impactos ambientales (Ley General del Ambiente, 2005).

“Artículo 75.- Del manejo integral y prevención en la fuente

75.1 El titular de operaciones debe adoptar prioritariamente medidas de prevención del riesgo y daño ambiental en la fuente generadora de los mismos, así como las demás medidas de conservación y protección ambiental que corresponda en cada una de las etapas de sus operaciones, bajo el concepto de ciclo de vida de los bienes que produzca o los servicios que provea, de conformidad con los principios establecidos en el Título Preliminar de la presente Ley y las demás normas legales vigentes” (Ley General del Ambiente, 2005).

Por otro lado, la Norma Técnica Peruana es la encargada de estandarizar los requisitos de calidad de los productos o servicios en el país y también contiene el concepto de ciclo de vida basado en las normas ISO. En el año 2013 fue publicada la NTP-ISO 14044 y, posteriormente en el 2017 fue publicada la NTP-ISO 14040. La primera contiene una descripción de la etapa de definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario y la evaluación del impacto. La segunda incluye la etapa de interpretación del ACV, así como información complementaria para su aplicación (INACAL, 2018).

2.4. ACV de edificios en Latinoamérica

En México se realizó una investigación a cargo del Centro Mario Molina (2014), en el cual se compararon los impactos ambientales causados por edificios para un escenario convencional y otro eficiente. Los edificios estudiados fueron un auditorio, un edificio habitacional, un hospital y un edificio de oficinas. En todos los casos, la etapa de uso resultó ser la más importante y lo que más destacó en ella fue la demanda de energía eléctrica y la generación de aguas residuales. Por otro lado, en la etapa de pre-uso se destacaron los impactos generados por los materiales usados en la estructura del edificio y en los acabados (Centro Mario Molina, 2014). La conclusión más resaltante del estudio fue que los impactos ambientales causados por el escenario convencional durante las etapas de pre-uso y uso se redujeron entre 32-92% en el escenario eficiente. La adecuación de edificios demostró ser una fuente de ahorro energético considerable. El escenario eficiente consistió en el uso de iluminación LED, la implementación de un sistema de captación de agua pluvial y el uso de paneles fotovoltaicos para producir electricidad (Centro Mario Molina, 2014).

Ochoa et al. (2017) realizaron un estudio en México, en el cual se comparó el consumo energético y los costos del ciclo de vida de dos tipos de vecindarios: uno compacto y otro extenso. A diferencia de la mayoría de los estudios, en esta investigación si se consideró el transporte de los habitantes en ambos escenarios. La etapa de uso demostró ser la más relevante

en ambos tipos de vecindarios. Además, tanto en la etapa de pre-uso como en la de uso, el vecindario extenso tuvo un mayor consumo energético. Esto debido a que el vecindario extenso requiere una mayor cantidad de materiales para su urbanización, las distancias para el transporte de las personas son más largas y requiere más procesos para el mantenimiento de su infraestructura. Este estudio demostró la importancia de incluir el transporte de las personas en el análisis del ciclo de vida porque demandó entre 26-28% de la energía primaria (Ochoa et al., 2017).

Gámez-García et al. (2019) compararon las etapas de ciclo de vida de una vivienda social en México, en la cual se analizaron seis posibles escenarios con muros y ventanas de diferentes materiales. El estudio encontró que, en todas las categorías ambientales analizadas, la fabricación de materiales, junto con el uso de quipos durante la construcción, el transporte de materiales y la demanda eléctrica para el funcionamiento del edificio fueron responsables de más del 70% de las emisiones generadas al ambiente. Además, estimó que por cada metro cuadrado de vivienda social construida se generan 11,275.8 Gg CO₂ equivalente al año (Gámez-García et al., 2019).

En Perú, el primer estudio de edificaciones estuvo a cargo de García (2014) y comprendió el análisis de todo el ciclo de vida (pre-uso, uso y fin de vida) de una vivienda unifamiliar construida en la ciudad de Lima. Los resultados mostraron que la etapa de uso demandó el 55% de la energía primaria total. Por otra parte, los impactos ambientales fueron más considerables durante la etapa de pre-uso, los cuales fueron generados principalmente por la manufactura de materiales altamente contaminantes como el cemento. Solo la categoría de uso de combustibles fósiles fue mayor en la etapa de uso. Esto debido a que a partir de los combustibles fósiles se genera la energía que es consumida en la etapa de operación de la edificación que fue mayor en dicha fase. Posteriormente, los resultados fueron comparados con un estudio de viviendas en Arizona (EEUU) realizado por Kahhat et al (2009). Las diferencias en la etapa de uso estuvieron dadas por el uso de sistemas de calefacción y aire acondicionado en el país norteamericano, lo cual incrementó el consumo de energía eléctrica (García, 2014).

Cáceres (2016) comparó dos edificaciones multifamiliares pertenecientes a distintos sectores socioeconómicos ubicados también en Lima. Las etapas del ciclo de vida consideradas también incluyeron las etapas de pre-uso, uso y fin de vida. Para la etapa de pre-uso, el modelo que pertenecía al sector socioeconómico más bajo (Modelo 1) tuvo un menor consumo de energía primaria por metro cuadrado. Esto debido a que el sistema estructural del Modelo 2 fue de placas y pórticos de concreto armado, mientras que en el Modelo 1 se utilizaron muros de

ductilidad limitada que tenían menores espesores. Por otro lado, en la etapa de uso el modelo 1 tuvo un consumo mayor, lo cual estuvo relacionado con la cantidad de habitantes por m². El modelo 2 tenía tres veces el área del primer modelo, por lo tanto, el consumo por m² resultó menor. El estudio también demostró que a mayor área de vivienda, mayor impacto ambiental, porque en el modelo 2 de mayor área, el consumo energético resultó más resaltante al igual que el potencial de calentamiento global y otras categorías de impacto (Cáceres, 2016).

Corzo (2016) realizó el ACV de una vivienda unifamiliar ubicada en la ciudad de Huancayo y comparó el uso de bloques de concreto y de ladrillos de arcilla en la tabiquería. La etapa de pre-uso (manufactura y construcción) destacó en las ocho categorías ambientales estudiadas como consecuencia de la gran cantidad de emisiones generadas durante la producción de materiales. Por otro lado, la etapa de uso tuvo el mayor consumo energético debido a la demanda de electricidad. La tabiquería construida con ladrillos de arcilla presentó el menor impacto ambiental en todas las categorías analizadas. No obstante, existen alternativas con menor huella ambiental como el ladrillo sílico-calcáreo o el de arcilla ligera cuyas materias primas abundan en el país (Corzo, 2016).

Aguilar y Loo (2017) estimaron los indicadores de ecoeficiencia para la demolición de un edificio universitario ubicado en Lima. Estos fueron hallados con el fin de servir como un referente para futuros proyectos de demolición. Para ello, se combinaron dos herramientas: Análisis del ciclo de vida (ACV) y Life Cycle Costing (LCC). Los resultados del ACV demostraron que la quema de combustibles fósiles producto del transporte de escombros y la fabricación de la maquinaria fue responsable de la mayoría de los impactos ambientales generados. Por cada metro cuadrado de edificio demolido se emitieron 38 kg de CO₂ equivalente (Aguilar & Loo, 2017).

Ramos (2018) empleó la herramienta de ACV para cuantificar el impacto ambiental de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Cusco. La etapa de pre-uso generó más del 50% de las emisiones relacionadas a las categorías de potencial de calentamiento global, agotamiento de ozono, acidificación y eutrofización. En la categoría de uso de recursos, el pre-uso demandó el 98% debido a la manufactura de materiales. La etapa de uso demandó el 53% de la energía primaria y en comparación con viviendas de Lima, el consumo de energía eléctrica fue menor. El estudio resaltó la necesidad de mejorar los procesos de fabricación de materiales como el concreto, el cemento, el acero y los ladrillos que predominan en las viviendas (Ramos, 2018).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DEL ACV

La herramienta de análisis de ciclo de vida es empleada en los edificios debido a que tiene un enfoque integral que permite comparar el impacto ambiental asociado a las etapas de manufactura de materiales, construcción, operación, mantenimiento, renovación y fin de vida (Bawden & Williams, 2015). En esta investigación se empleó el ACV con el fin de identificar la etapa más importante de un edificio de oficinas ubicado en Lima (Perú). Si bien un edificio es considerado un producto complejo por su carácter único, el ACV permite hallar las entradas y salidas asociadas a cada etapa de su ciclo de vida (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013).

Dependiendo del procedimiento que se utilice para recopilar información durante la realización del ACV, este puede ser de tres tipos. El primero es el ACV de procesos que es considerado el más complejo, porque se requiere buscar información sobre las entradas y salidas de cada proceso incluido (Kucukvar et al., 2014). El segundo es el ACV basado en el enfoque insumo-producto, el cual emplea unas matrices que contienen datos sobre las emisiones, las demandas de energía y los materiales usados en las industrias de cada país (Carnegie Mellon University, 2016). El último es el ACV híbrido, el cual combina los dos procedimientos mencionados anteriormente (Kucukvar et al., 2014). En esta investigación se empleó el ACV de procesos y a continuación se describirá su metodología.

3.1. Definición de ACV

La norma ISO define al ACV como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto. Se conoce como estudio “de la cuna a la tumba” porque incluye “la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclaje hasta la disposición final” (ISO, 2006). En la norma el término “producto” hace referencia a cualquier bien o servicio, lo cual permite el uso del ACV en distintos sectores, siendo uno de ellos la construcción de edificios (ISO, 2006).

Esta herramienta ayuda a identificar, cuantificar, interpretar y evaluar los impactos medioambientales de manera ordenada (ISO, 2006). Esas características convierten a esta en una herramienta adecuada para la toma de decisiones en políticas públicas y privadas relacionadas a la gestión ambiental de un producto. Además, para asegurar el adecuado uso de la herramienta al momento de comparar estudios, la norma plantea requisitos que garanticen la equivalencia de los mismos (ISO, 2006).

Las normas ISO 14040 e ISO 14044 fueron publicadas en el 2006 y contienen la metodología del ACV, asimismo las ISO/TR 14047, ISO/TS 14048 y la ISO/TR 14049 complementan la norma. La ISO 14040 presenta una descripción general de la metodología del ACV, sus principios, sus etapas, sus campos de aplicación, sus definiciones y establece sus limitaciones. Abarca dos tipos de estudios: el Análisis de ciclo de vida y el Análisis del inventario del ciclo de vida, el cual es similar a un ACV pero no incluye la etapa de Evaluación de impacto (ISO, 2006). La norma ISO 14044 contiene los requerimientos que hacen que un estudio de ACV cumpla los parámetros de la ISO, así como los procedimientos para llevar a cabo de manera adecuada cada una de las etapas del ACV (ISO, 2006). Sin embargo, las normas no hacen una descripción detallada del uso de la técnica del ACV ni plantea el uso de metodologías para sus etapas, por lo tanto, los resultados de la aplicación dependerán de las características de cada estudio.

3.2. Etapas del ACV

Las etapas fueron definidas en la primera versión de la norma ISO en 1997 y son las mismas en la actualidad, las cuales están compuestas por la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación (ISO, 2006). Como se puede observar en la Figura 3.1 propuesta por la ISO, la etapa de interpretación está presente en todas las etapas anteriores y se interrelaciona con cada una de ellas. Esto debido a que para elaborar las conclusiones de un estudio de ACV se debe hacer una revisión de todas las etapas previas y verificar que estén cumpliendo con los objetivos del estudio (ISO, 2006).

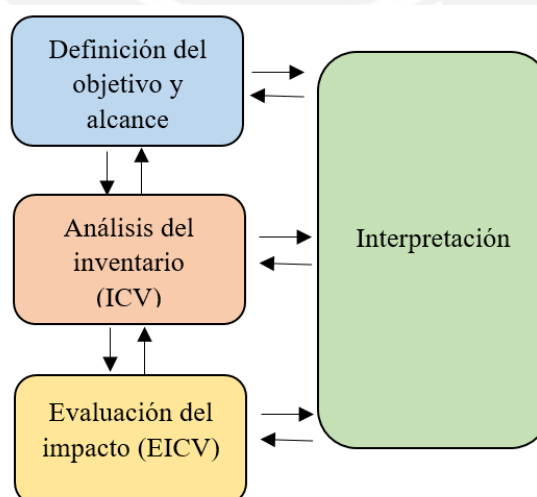


Figura 3.1: Etapas del ACV
Fuente: ISO 14040:2006

a) Definición del objetivo y alcance

Esta es una de las etapas más importantes, porque los resultados del estudio dependerán de la definición todos sus elementos. El objetivo expresa el motivo por el cual se realiza el estudio según los requerimientos de la investigación, mientras que el alcance establece cuál será el sistema en estudio para proceder con la recolección de información necesaria. Esto definirá qué tan exhaustivo será el estudio para lograr los objetivos previamente definidos (ISO, 2006).

Según la norma ISO, para describir adecuadamente el alcance del estudio se requiere definir lo siguiente:

- Descripción del sistema en estudio
- Unidad funcional
- Límites del sistema
- Metodología de impacto ambiental
- Requerimientos de información
- Limitaciones encontradas
- Suposiciones hechas

a.1) Unidad funcional

Es una unidad de referencia que permite expresar las entradas y salidas del sistema en estudio de acuerdo a su función principal (Klöpffer & Curran, 2014). Su elección resulta fundamental porque de esta dependen qué elementos se incluirán dentro del sistema en estudio. Además, para realizar la comparación de dos o más estudios es necesario que todos tengan la misma unidad funcional (ISO, 2006).

Los edificios, por ejemplo, tienen varias funciones, por ello la falta de una definición clara de la unidad funcional ha generado que se excluyan procesos en los estudios (Bawden & Williams, 2015). Los resultados del ACV de un edificio residencial podrían ser expresados por “unidad de vivienda” o por “m² de vivienda construida”, porque la función del sector inmobiliario es la construcción de viviendas. En ambos casos se debería indicar el periodo de tiempo que se está considerando. Por ejemplo, “el consumo de energía primaria por m² de vivienda construida durante 1 año”.

a.2) Límites del sistema

Son las restricciones que permiten la delimitación del sistema para decidir qué procesos unitarios serán incluidos. Los procesos unitarios son aquellos que en conjunto conforman el

sistema en estudio y que están unidos mediante flujos de procesos intermedios, tal como se ve en la Figura 3.2. Cada uno de ellos tiene sus propias entradas y salidas y es la unidad más pequeña de la cual se tiene información (Klöpffer & Curran, 2014). Al subdividir el sistema en procesos unitarios se pueda identificar mejor la información que se requiere recolectar (ISO, 2006).

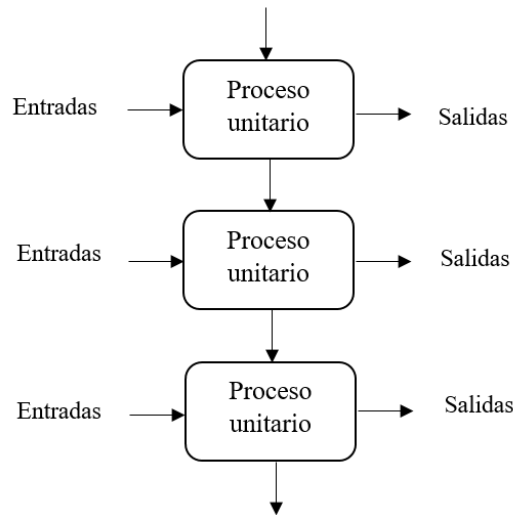


Figura 3.2: Conjunto de procesos unitarios
Fuente: ISO 14041:1998

Los límites son necesarios debido a que al analizar todo el ciclo de vida de un producto se podrían incluir muchas entradas y salidas (Ver Figura 3.3). Algunos factores que determinan los límites son el objetivo del estudio, el acceso a la información, los recursos para la realización del estudio y las características del sistema (ISO, 2006).

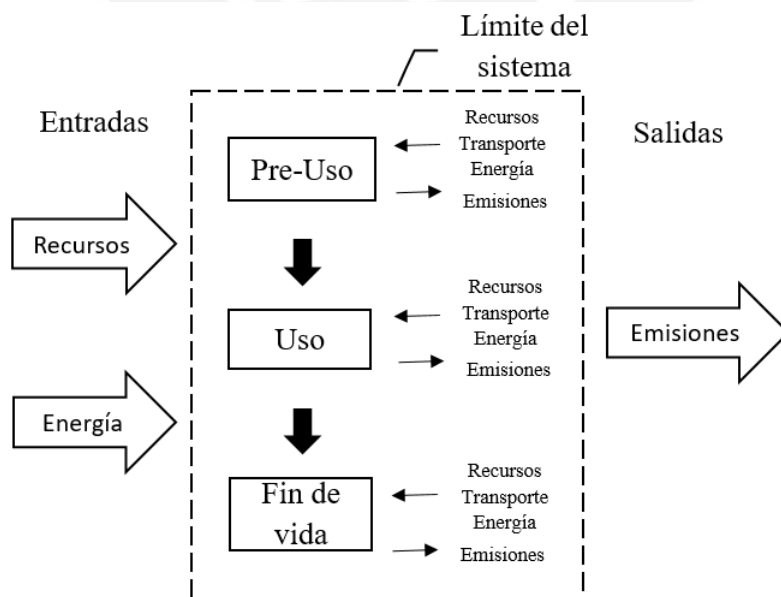


Figura 3.3: Ejemplo del sistema de un producto
Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones que se especifican incluyen los límites geográficos, los límites temporales, el límite entre el ciclo de vida del sistema en estudio y el ciclo de vida de los materiales que forman parte de él, así como los productos derivados del mismo (Tillman et al, 1994). Por ejemplo, durante la definición del alcance de la etapa de uso de un edificio de oficinas se podría considerar o no dentro del sistema el transporte que realiza diariamente el personal que trabaja allí, además del consumo de electricidad y agua.

b) Análisis del inventario

Esta etapa consiste en la obtención de las entradas y salidas de cada una de las etapas del ciclo de vida. Este proceso es iterativo porque pueden encontrarse limitaciones o nuevos requerimientos que cambiarían el tipo de procedimiento para la recolección de datos. También es necesario realizar la interpretación de la información obtenida para verificar que cumpla con los requerimientos de los objetivos y el alcance del estudio (ISO, 2006). La información requerida para completar esta etapa puede ser primaria o secundaria. La primera es proporcionada por el productor o fabricante, mientras que la segunda es obtenida a partir de bases de datos (Klöpffer & Curran, 2014).

En esta etapa el uso de software es necesario en muchos casos para la creación del inventario, porque el análisis de los datos puede ser complejo. Estos programas contienen las entradas y salidas involucradas en la fabricación de diferentes tipos de productos o procesos de distintas regiones (AIA, 2010). No obstante, las bases de datos deben ser evaluadas cuidadosamente, puesto que se deben emplear los datos más similares a la realidad que se desee modelar. Una de las herramientas más difundidas para realizar un ACV y que fue empleado en esta investigación por su fácil uso es el software SimaPro. Este fue desarrollado por Pré Consultants hace 25 años y fue creado con el fin de facilitar los cálculos, porque compara y analiza complejos sistemas mediante la descomposición de sus procesos y los materiales involucrados en ellos (Pré Consultants, 2016).

La base de datos Ecoinvent está incluida en SimaPro y es una de las más difundidas. En la actualidad, cuenta con más de 17000 inventarios del análisis de ciclo de vida para diversas áreas en estudio incluyendo materiales y maquinaria pertenecientes a la industria de la construcción (Ecoinvent, 2018). Para la realización del inventario del ciclo de vida, Ecoinvent posee diferentes versiones de su base de datos. Estas se obtienen a partir de la elección de un modelo de sistema (APOS, Cut-off y Consequential) y un tipo de proceso (unitario o de sistema), los cuales forman seis versiones en total (Ecoinvent, 2018). El modelo de sistema

especifica cómo se relacionan los procesos unitarios para la formación de un producto. En el modelo APOS (Allocation at the point of substitution) se aplica el enfoque atribucional, el cual asigna cargas ambientales y recursos a los procesos, además de analizar cómo estos se interrelacionan dentro de un determinado sistema (Bikker et al., 2018). Cut-off también utiliza el enfoque atribucional, pero en este caso los materiales obtenidos a partir del proceso de reciclaje no tienen la carga ambiental de la fabricación del material original (Ecoinvent, 2018). El modelo Consequential emplea el enfoque de sustitución y es usado cuando se desea predecir los efectos de algún cambio dentro de un sistema existente (Weidema, 2011). Por otro lado, el tipo de proceso define la forma en la que se mostrará la información sobre un proceso sin variar los resultados finales. Un proceso unitario contiene información sobre los recursos que se están usando, las emisiones y cómo se relacionan los procesos entre sí. Por el contrario, un proceso de sistema solo muestra un listado de las sustancias empleadas sin indicar los procesos en las que están involucrados. Cabe resaltar que un proceso unitario permite realizar análisis estadísticos, porque contiene información sobre la incertidumbre de la información, lo cual no sucede con un proceso de sistema (Pré Consultants, 2016). En esta investigación se empleó la base de datos Ecoinvent con el enfoque atribucional y se decidió trabajar con procesos unitarios para tener un mayor detalle de las entradas y salidas de los procesos.

c) Evaluación del impacto

En esta etapa las emisiones de los productos y los procesos incluidos en el inventario se convierten en impactos ambientales. Para ello existen metodologías que contienen un conjunto de categorías de impacto y sus respectivos indicadores ambientales, cuya elección depende de los objetivos del estudio (ISO, 2006).

Un indicador ambiental es la unidad que representa a la categoría de impacto. Por ejemplo, si se deseara calcular el impacto de la categoría de calentamiento global se tendría que incluir las emisiones de todos los gases de efecto invernadero como el CO₂, CH₄, entre otros. El indicador más usado para calcular el calentamiento global es la cantidad de kg de CO₂, por lo tanto, los demás gases deberían ser convertidos a kg de CO₂ equivalentes (Reiter, 2010). Tanto las categorías de impacto como los indicadores ambientales deben tener reconocimiento internacional para poder ser usados (ISO, 2006).

c.1) Subetapas

La norma ISO 14044 (2006) define elementos obligatorios y opcionales para la realización del análisis de impactos (Ver Figura 3.4). El análisis de la calidad de los datos solo será obligatorio cuando se realicen estudios comparativos.

- Selección: consiste en la elección de las categorías de impacto, los indicadores y el modelo de caracterización. Dependerá de los objetivos y el alcance ya definidos.
- Clasificación: consiste en la asignación de los resultados del ACV a las categorías de impacto seleccionadas en el primer paso, los cuales son clasificados de acuerdo a su contribución a los problemas ambientales existentes.
- Caracterización: consiste en el cálculo de los resultados de cada indicador ambiental. A cada sustancia se le multiplica por un factor de caracterización que representa su importancia dentro de la categoría ambiental.

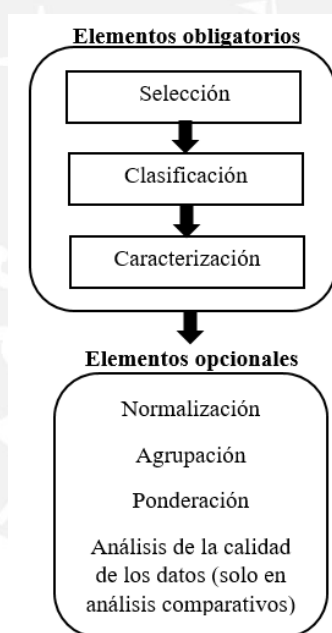


Figura 3.4: Elementos obligatorios y opcionales de la etapa de evaluación de impactos

Fuente: ISO 14044:2006

c.2) Metodologías de impacto

Dependiendo del nivel de análisis que se realice, las metodologías que evalúan los impactos ambientales pueden ser de dos tipos: punto medio y punto final (AIA, 2010). El primero analiza el efecto intermedio del impacto ambiental, por ejemplo, la emisión de CO₂ al ambiente que contribuye con el potencial de calentamiento global. El segundo analiza el efecto

último del impacto ambiental que genera daño al medio ambiente y a las personas. Por ejemplo, el calentamiento global genera la pérdida de hábitats.

El software SimaPro posee 19 metodologías de punto medio y 8 metodologías de punto final (SimaPro, 2018). El presente estudio empleó una metodología de punto medio. TRACI y CED fueron elegidas porque ambas fueron previamente usadas en una investigación que analizó el ciclo de vida de edificaciones residenciales en Lima (Cáceres, 2016) y buscó realizar una comparación entre los resultados de ambos tipos de edificios (residencial y de oficinas). Además, TRACI contiene diez categorías de impacto ambiental, lo cual permite analizar un espectro amplio de impactos ambientales. Asimismo, CED muestra de forma detallada el consumo de energía primaria de seis diferentes fuentes.

c.2.1) TRACI

Las siglas traducidas del inglés significan “Herramienta para la reducción y análisis de los Impactos Químicos y Ambientales”. La primera versión fue lanzada en el año 2003 y fue creada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para ser empleada en ese país. TRACI permite comparar productos en el aspecto medioambiental, porque facilita la caracterización para hallar los potenciales impactos ambientales asociados a la fabricación de productos (EPA, 2012). La versión empleada en esta investigación fue TRACI 2.1 v1.04, la cual posee diez categorías de impacto de punto medio (EPA, 2012), tal como se muestra en la Tabla 3.1.

- Pérdida de la capa de ozono: Los clorofluorocarbonos (CFCs) fueron reconocidos en los años 70s como unas de las sustancias que agotan el ozono de la atmósfera, porque pueden permanecer allí hasta 150 años (Molina & Rowland, 1974). Al agotarse el ozono, la cantidad de radiación UVB se incrementa, lo cual genera enfermedades en las personas sobre todo en la piel y en los ojos. Por ello, en 1987 se firmó el protocolo de Montreal con la finalidad de disminuir la emisión de ese tipo de sustancias y se espera que para el año 2065 la capa de ozono se recupere del daño (EPA, 2018a). El indicador ambiental para medir esta categoría es el kg de CFC-11 equivalente.
- Calentamiento global: Los gases de efecto invernadero atrapan el calor en la atmósfera y ocasionan que la tierra se caliente. Si bien es un fenómeno natural, el exceso de gases producto de la actividad humana puede generar el cambio del clima por el incremento de la temperatura global (EPA, 2017). Algunos gases que generan el efecto invernadero son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido

nitroso (N_2O) y los clorofluorocarbonos (CFCs). Todos ellos excepto el vapor de agua tienen un tiempo de vida larga en la atmósfera y ocasionan el efecto de calentamiento global (NASA, 2018). El indicador ambiental para medir esta categoría es el kg de CO_2 equivalente.

- **Formación de smog:** El smog fotoquímico es el producto de la mezcla de algunos contaminantes que reaccionan con la luz del sol y forman una neblina marrón sobre las ciudades. Ejemplo de algunos contaminantes son el óxido de nitrógeno (NO_x), el ozono (O_3), el nitrato de peroxiacetilo (PAN) y los compuestos orgánicos volátiles o VOCs (EPA, 2004). El principal compuesto del smog es el ozono que se forma producto de las reacciones químicas de los gases provenientes de los autos, las plantas industriales, entre otros. Al concentrarse al nivel del suelo ocasiona daños al ambiente y a la salud de las personas (EPA, 2018b). El indicador ambiental para medir esta categoría es el kg de O_3 equivalente.
- **Acidificación:** Es el proceso por el cual los ecosistemas acuáticos se vuelven más ácidos. Las fuentes principales de sustancias contaminantes son la lluvia ácida y el drenaje ácido de las minas, las cuales generan una disminución del PH y tienen efectos dañinos en los ecosistemas (EPA, 2016a). La lluvia ácida es causada principalmente por la actividad humana, puesto que actividades como la combustión de combustibles fósiles ha generado la emisión de una gran cantidad de gases a la atmósfera como el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Dichos gases reaccionan con otras sustancias y forman contaminantes ácidos (EPA, s.f.). El indicador ambiental para medir esta categoría es el kg de SO_2 equivalente.
- **Eutrofización:** El exceso de fósforo y nutrientes en el agua genera el florecimiento acelerado de algas en los medios acuáticos, lo cual daña el hábitat de las especies marinas, consume el oxígeno que estas necesitan y en general deteriora la calidad del agua (EPA, 2016b). Las personas también pueden perjudicarse si entran en contacto con el agua, debido a que las algas producen cantidades elevadas de toxinas y bacterias. Generalmente el fósforo y los nutrientes provienen de actividades humanas como la agricultura, la generación eléctrica y el incorrecto tratamiento de las aguas servidas (EPA, 2016b). El indicador ambiental para medir esta categoría es el kg N equivalente.

Tabla 3.1: Categorías de impacto de la herramienta TRACI

Categoría de impacto	Indicador ambiental
Pérdida de la capa de ozono	kg CFC-11 eq
Calentamiento global	kg CO ₂ eq
Formación de smog	kg O ₃ eq
Acidificación	kg SO ₂ eq
Eutrofización	kg N eq
Sustancia cancerígenas	CTUh
Sustancia no cancerígenas	CTUh
Efectos respiratorios	kg PM _{2.5} eq
Ecotoxicidad	CTUe
Uso de combustibles fósiles	MJ

Fuente: Elaboración propia

- Salud humana (Sustancias cancerígenas, Sustancias no cancerígenas y Ecotoxicidad): Estas categorías cuantifican el impacto potencial de los químicos que son emitidos al ambiente. El modelo USEtox es usado para realizar el cálculo e incluye el efecto de más de 3000 sustancias relevantes a nivel mundial (EPA, 2012). Los indicadores ambientales usados para medir estas categorías están expresados en CTUh (sustancias cancerígenas y no cancerígenas) y en CTUe (ecotoxicidad).
- Efectos respiratorios: La generación de material particulado (mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas) puede deberse a reacciones químicas en el aire de sustancias como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, aunque también pueden ser partículas ya existentes como el polvo (EPA, 2018c). Las partículas se clasifican según su tamaño y se denominan partículas finas si son menores a 2.5 micrómetros o partículas inhalables si su tamaño está entre los 2.5 y 10 micrómetros. El tamaño reducido de estas partículas genera que estas pueden ingresar fácilmente al organismo de las personas y ocasionar enfermedades (EPA, 2018c). El indicador ambiental para medir esta categoría está expresado en kg PM_{2.5} eq.
- Uso de combustibles fósiles: Esta categoría cuantifica la cantidad de energía generada en base a combustibles fósiles que es necesaria para la fabricación de algún producto (AIA, 2010). El indicador ambiental para medir esta categoría está expresado en MJ.

c.2.2) CED

La metodología CED (consumo de energía primaria traducida al español) fue desarrollada por Ecoinvent en los años setenta debido a la crisis de petróleo y a la preocupación por el agotamiento de los combustibles (Ecoinvent, 2010). La herramienta permite calcular el consumo directo o indirecto de energía durante todo el ciclo de vida de un producto incluyendo su extracción, manufactura y disposición final (Huijbregts et al., 2010). Las fuentes de energía pueden ser renovables o no renovables (Ecoinvent, 2010), tal como se puede ver en la Tabla 3.2. Este método no incluye el proceso de normalización, porque busca hallar la energía acumulada para cada tipo de fuente energética. La versión 1.10 fue empleada en este estudio.

Tabla 3.2: Tipos de fuentes energéticas de la herramienta CED

Categoría de impacto	Indicador ambiental
No renovable, Fósil	MJ
No renovable, Nuclear	MJ
No renovable, Biomasa	MJ
Renovable, Biomasa	MJ
Renovable, Viento, Sol, Geotérmica	MJ
Renovable, Agua	MJ

Fuente: Elaboración propia

d) Interpretación

Los resultados del análisis de inventario y el análisis de impactos son interpretados en conjunto durante esta etapa para establecer las conclusiones más relevantes del estudio en relación con los objetivos previamente definidos. El ACV permite identificar la etapa del ciclo de vida que posee un mayor impacto ambiental y en esta fase se plantean recomendaciones para el producto o servicio en estudio (ISO, 2006). Esta etapa es iterativa porque analiza la calidad de los datos y su consistencia con los alcances y objetivos iniciales (ISO, 2006). Las conclusiones pueden servir para la toma de decisiones en el ámbito de gestión ambiental por parte de autoridades del gobierno o empresas privadas (AIA, 2010). El ACV es una herramienta que permite la comparación de los resultados de diferentes escenarios siempre y cuando se cumplan los requerimientos de la norma para comprobar la equivalencia entre ambos sistemas (ISO, 2006).

d.1) Análisis de sensibilidad

Este es un método de verificación de resultados que puede ser empleada en la etapa de interpretación, porque permite analizar el efecto de un parámetro que genera incertidumbre

dentro del sistema. Para ello, compara varios escenarios dependiendo del número de parámetros que se desee analizar (Klöppfer & Curran, 2014). En este estudio se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con el fin de comparar la incidencia del tiempo de vida útil en el ciclo de vida del edificio de oficinas. La definición del tiempo de vida de un edificio durante la realización de un ACV puede ser incierta debido a la diferencia que existe entre cada edificio por los materiales que los conforman y el ambiente que los rodean. Sin embargo, el efecto de esta elección se refleja en los resultados, puesto que los impactos ambientales de la etapa de pre-uso se pueden incrementar si se elige un tiempo de vida corto o la etapa de uso podría resultar mayor si se elige un tiempo de vida largo (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019).

3.3. Procedimiento para el uso de SimaPro

En la Figura 3.5 se muestra un resumen del procedimiento seguido para el uso del software SimaPro empleado en esta investigación. En primer lugar, se recopiló información sobre los materiales, los equipos y los procesos constructivos empleados. A partir de ello se seleccionaron o modificaron los procesos incluidos en la base de datos Ecoinvent y se nombraron nuevos procesos. Finalmente, se crearon los montajes para ordenar las etapas del ciclo de vida y colocar el metrado de cada material. A continuación, se explicará cada paso seguido en el software SimaPro para crear un proceso y calcular su impacto ambiental. La creación del proceso relacionado al porcelanato será tomado como ejemplo.

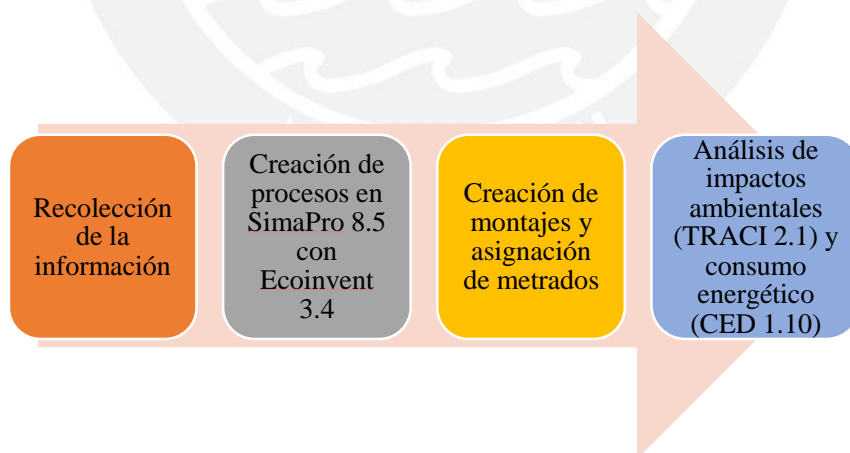


Figura 3.5: Pasos seguidos para el uso del software SimaPro

Fuente: SimaPro 8

a. Creación de procesos

Dentro de la etapa de acabados (pre-uso) del edificio se utilizó porcelanato para enchapar los pisos de algunos ambientes. Los materiales requeridos para su instalación fueron el porcelanato y el pegamento. Luego de la selección del proceso más adecuado de Ecoinvent, se creó el proceso unitario “Porcelanato” y se calculó la cantidad de material que se requiere para enchapar 1m² de piso. A partir de ello se creó el proceso unitario que se muestra en la Figura 3.6.

Products									
Outputs to technosphere: Products and co-products									
	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	Category	Comment		
Porcelanato 1m2	1	m2	Area	100 %		PROCESOS...\Arquitectura			
Outputs to technosphere: Avoided products									
	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Inputs									
Inputs from nature									
Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Inputs from technosphere: materials/fuels									
	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Ceramic tile [RoW]] production APOS, U	21.10	kg	Undefined						
Cement mortar [RoW]] production APOS, U	5	kg	Undefined						
Inputs from technosphere: electricity/heat									
Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Outputs									
Emissions to air									
Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Emissions to water									
Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		
Emissions to soil									
Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment		

Figura 3.6: Creación del proceso unitario
Fuente: SimaPro 8

b. Creación de montajes

Se creó un montaje llamado “Pre-uso”, dentro del cual se incluyó la etapa de manufactura del edificio. Dentro de este último, se incluyeron los materiales usados en la implementación del edificio durante la fase de acabados. En la Figura 3.7 se observan todos los materiales que fueron incluidos en dicho montaje. Posteriormente, a cada uno de ellos se le asignó el metrado correspondiente (Ver Figura 3.8) de acuerdo a la información brindada por el constructor.

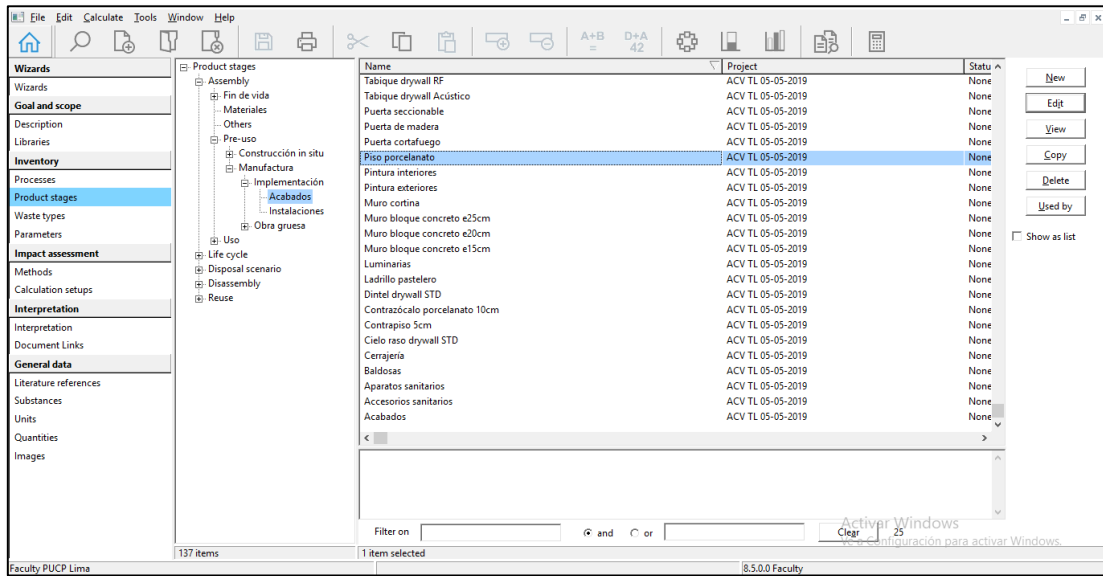


Figura 3.7: Creación de montajes
Fuente: SimaPro 8

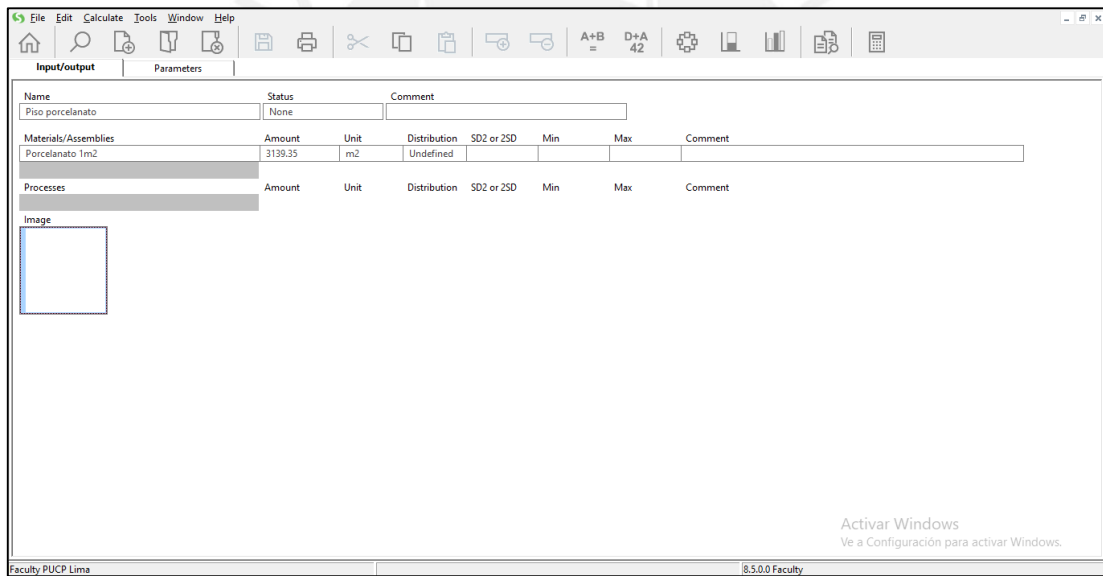


Figura 3.8: Asignación de metrados
Fuente: SimaPro 8

c. Evaluación de impactos

Luego de crear todos los montajes se realizó la evaluación de impactos con la metodología TRACI 2.1 que posee SimaPro. Para ello se utilizó la herramienta de cálculo del software. Se comparó la huella ambiental del porcelanato usado en el piso con los impactos de la pintura empleada en los interiores del edificio. El software permitió observar los resultados en gráficos tal como se ve en la Figura 3.9 o en tablas como en la Figura 3.10. De manera similar se obtuvieron los resultados de la metodología CED.

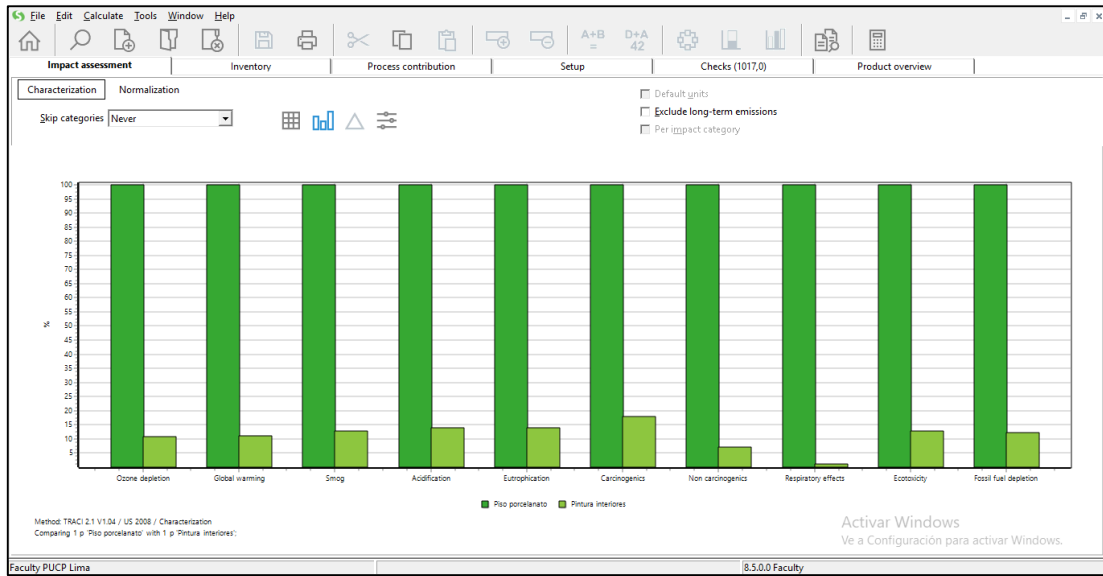


Figura 3.9: Comparación gráfica de los impactos ambientales dos procesos
Fuente: SimaPro 8

Se	Impact category	Unit	Piso porcelanato	Pintura interiores
<input checked="" type="checkbox"/>	Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.00555	0.000604
<input checked="" type="checkbox"/>	Global warming	kg CO2 eq	5.69E4	6.25E3
<input checked="" type="checkbox"/>	Smog	kg O3 eq	2.78E3	355
<input checked="" type="checkbox"/>	Acidification	kg SO2 eq	261	36.2
<input checked="" type="checkbox"/>	Eutrophication	kg N eq	189	26.7
<input checked="" type="checkbox"/>	Carcinogenics	CTUh	0.00468	0.000842
<input checked="" type="checkbox"/>	Non carcinogenics	CTUh	0.0322	0.00231
<input checked="" type="checkbox"/>	Respiratory effects	kg PM2.5 eq	629	6.52
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecotoxicity	CTUe	6.18E5	7.85E4
<input checked="" type="checkbox"/>	Fossil fuel depletion	MJ surplus	7.47E4	9.07E3

Figura 3.10: Datos de los impactos ambientales de dos procesos
Fuente: SimaPro8

CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO

4.1. Descripción del objeto en estudio

El edificio de oficinas que se analizó está ubicado en el distrito de Surquillo en Lima (Ver Figura 4.1) y fue construido sobre un terreno adquirido por una empresa privada. Todo el edificio sirve como centro de trabajo del personal de la misma empresa y para ello cuenta con espacios como la recepción, salas de reuniones, oficinas, una terraza, tres ascensores, servicios higiénicos y estacionamientos. Los ambientes están distribuidos en una torre de 9 pisos, una azotea, 4 sótanos para estacionamientos y un cuarto de máquinas que comprenden un área en planta aproximada de 530 m² y un área techada total de 6440 m². El tiempo de construcción del edificio fue de 18 meses y actualmente se encuentra operativo.



Figura 4.1: Plano de ubicación del edificio empresarial

Fuente: Google Maps

En la Figura 4.2 se muestra un plano de elevación del edificio de oficinas. El sistema estructural está formado por placas y pórticos de concreto armado y la cimentación es a base de zapatas y vigas de amarre. Los techos están conformados por losas aligeradas y losas macizas. El sistema de iluminación es LED en todos los ambientes y los aparatos y accesorios sanitarios son ahorradores de agua. Además, el edificio está compuesto por un muro cortina de vidrio templado en la fachada frontal y mamparas en la fachada posterior. La tabiquería está formada por bloques de concreto y drywall. El edificio también posee instalaciones eléctricas, sanitarias

y cuenta con un sistema de ventilación y aire acondicionado del tipo VRF. El suministro de electricidad y agua proviene de la red pública.

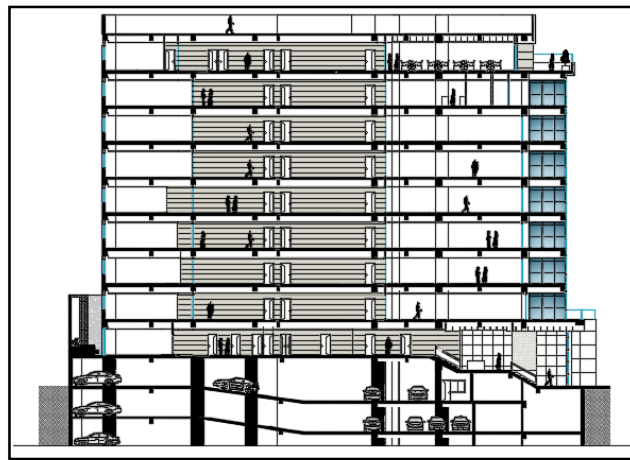


Figura 4.2: Plano de elevación del edificio empresarial

4.2. Límites del sistema

El presente estudio se llevó a cabo con la finalidad de hallar el consumo energético, así como los impactos ambientales generados en todas las etapas del ciclo de vida de un edificio de oficinas ubicado en la ciudad de Lima. Debido a que se trata de un estudio holístico se consideraron todas las etapas del ciclo de vida desde “la cuna hasta la tumba” (ISO, 2006). Las etapas se dividieron en pre uso (manufactura y construcción), uso (operación y mantenimiento) y fin de vida (demolición y transporte de escombros). En el estudio no se consideraron los trabajos de demolición previos a la construcción, porque dichas actividades pertenecen al ciclo de vida de la edificación anterior. En la Figura 4.3 se observa un esquema que resume el sistema en estudio.

La tecnología considerada fue la actual y no se consideró la evolución de la matriz de generación eléctrica peruana durante la vida útil de la edificación. Sin embargo, existen estudios como el realizado por Nygaard-Rasmussen et al. (2013) en el que hallaron el efecto que tendría el uso de una matriz de generación eléctrica variable a lo largo de la vida útil (50 años) de un edificio. En el estudio se consideró que en un futuro la matriz tendría una mayor participación de fuentes renovables. A pesar de que se encontraron diferencias en los resultados, el estudio concluyó que no se justifica el uso de una matriz variable debido a la incertidumbre que genera la proyección de los cambios en la matriz en un periodo de tiempo tan largo.

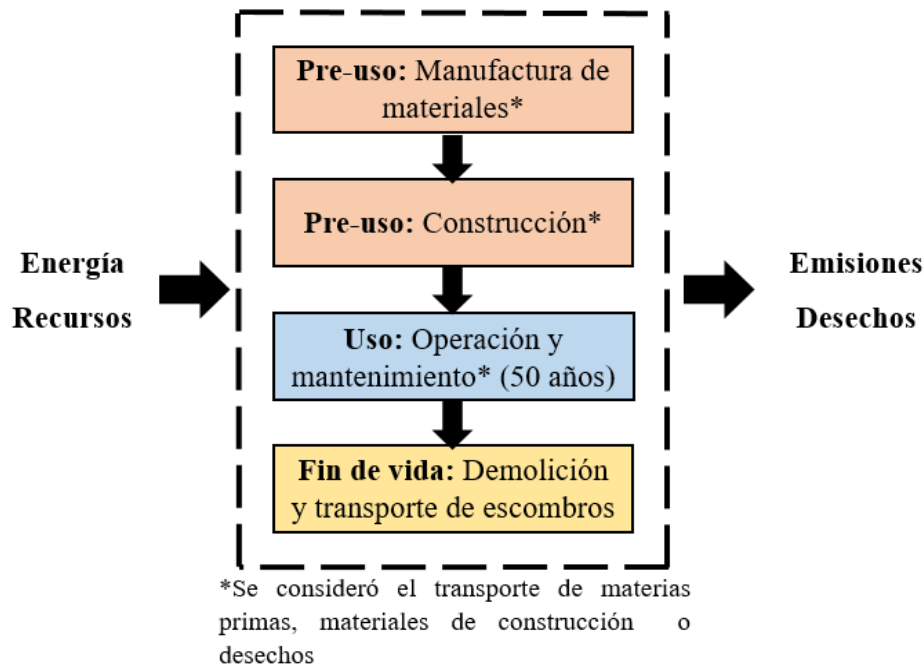


Figura 4.3: Límites del sistema en estudio
Fuente: Elaboración propia

El tiempo de vida útil considerado para el edificio fue 50 años, porque es el tiempo que se estima para el diseño de edificios en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente (El Peruano, 2018) y es el periodo que comúnmente se emplea en este tipo de estudios (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019). No obstante, en el punto 4.4 se explica que se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de este parámetro en el ciclo de vida del edificio, debido a que su elección puede afectar a los resultados (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019). Con el fin de comparar los hallazgos del presente estudio con otras investigaciones se decidió utilizar como unidad funcional el “metro cuadrado de edificio construido para un periodo de 50 años”.

4.3. Inventario del sistema

En cada una de las etapas se consideraron los materiales y los procesos involucrados de acuerdo a los metrados de obra, las fichas técnicas de los materiales y las consultas a los constructores y propietarios del edificio. Solo en la etapa de fin de vida se realizaron estimaciones, porque el edificio aún sigue operativo. Los procesos incluidos fueron los más notables dentro del ciclo de vida, porque están presentes en gran cantidad dentro el edificio, por sus altos consumos energéticos o por la función que cumplen. En la Figura 4.4, se puede ver un esquema que resume todos los procesos que se incluyeron en cada una de las etapas del ciclo de vida del edificio.

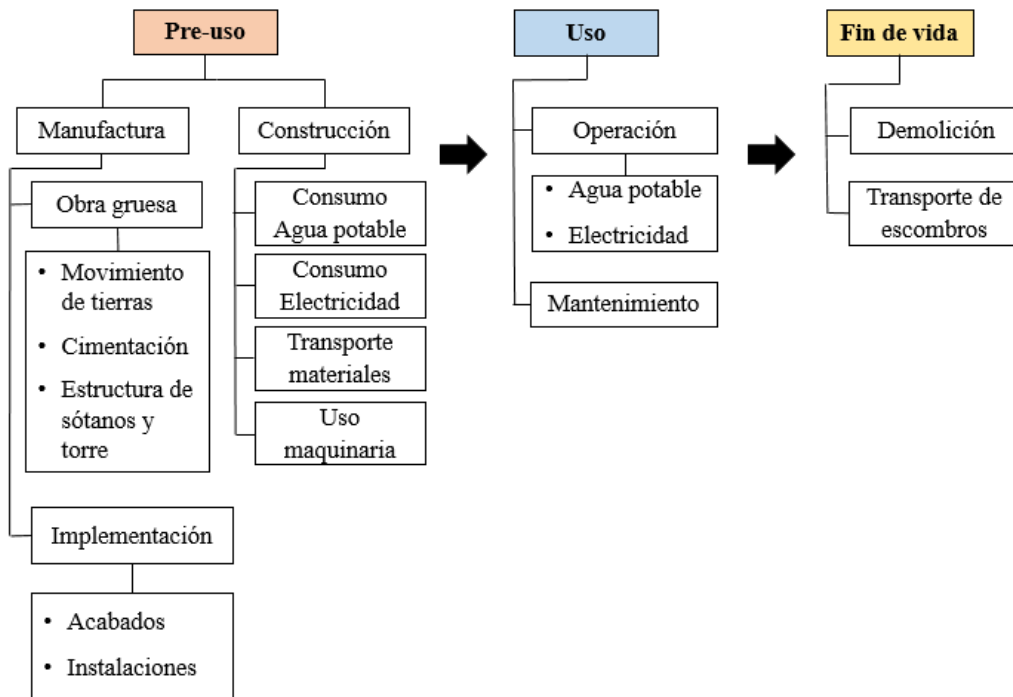


Figura 4.4: Procesos incluidos todas las etapas del ciclo de vida
Fuente: Elaboración propia

a. Etapa de pre-uso

La etapa de pre uso fue subdividida en la manufactura de los materiales y la construcción in situ. El edificio de oficinas tuvo un tiempo de ejecución total de 18 meses y estuvo dividido en dos grandes fases: obra gruesa e implementación. La etapa de obra gruesa estuvo conformada por el movimiento de tierras, la cimentación y la estructura de los sótanos y la torre. El movimiento de tierras incluyó la excavación masiva, el transporte del material sobrante y la construcción de los muros anclados. Durante la cimentación estuvo incluida la construcción de las zapatas y las vigas de cimentación. La estructura de la torre y los sótanos incluyó la construcción de todos los elementos verticales y horizontales. Por otro lado, la fase de implementación comprendió los acabados de arquitectura y las instalaciones (IIEE, IISS y ACI).

La etapa de manufactura consideró la extracción de las materias primas, el traslado al lugar de fabricación y los procesos para la obtención de todos los materiales empleados en la estructura, los acabados y las instalaciones del edificio. La fabricación de los equipos del sistema HVAC y los ascensores no fue considerada debido a que no se encontraron procesos que los representaran. Sin embargo, un estudio realizado por Bawden y Williams (2015) resaltó la importancia de incluir la manufactura de los equipos del sistema HVAC cuando se considera

su consumo energético, porque al no hacerlo se estaría exagerando la contribución de la etapa de operación, mientras que la incidencia de la manufactura reduciría.

En la etapa de obra gruesa se consideró la manufactura del concreto premezclado, el acero de refuerzo, el mortero y los bloques de tecnopor para las losas aligeradas. Por otro lado, la implementación comprendió las instalaciones sanitarias, eléctricas, el sistema HVAC y el sistema de detección y extinción. Las tuberías y los accesorios de las instalaciones fueron principalmente de PVC, acero inoxidable, cobre, aluminio y bronce. Los acabados incluyeron los materiales usados en la tabiquería (drywall y bloques de concreto), el porcelanato de los pisos, el vidrio (ventanas, las mamparas y muro cortina), el ladrillo pastelero de la azotea, la pintura, el contrapiso, las baldosas del cielo raso, las puertas (metálicas y de madera) y, finalmente, los aparatos y los accesorios sanitarios.

Uno de los materiales que tuvieron una masa importante durante la manufactura fue el concreto (8238 tn). El artículo realizado por Vázquez-Rowe et al. (2019) sirvió como referencia para crear el proceso de producción peruana de cemento, además se solicitó a la empresa constructora las fichas técnicas del concreto premezclado. De las tres plantas cementeras analizadas en el estudio, se eligieron los valores calculados para la CP1, porque esta fabrica cemento Portland y produce clinker en Perú, al igual que la empresa proveedora del edificio de oficinas. Según los hallazgos del estudio, la producción de 42.5 kg de cemento genera la emisión de 32 kg de CO₂ equivalente y el proceso creado tuvo el mismo potencial de calentamiento global.

La etapa de construcción incluyó el transporte de todos los materiales y del desmonte producto de la actividad constructiva asumiendo el uso de camiones con capacidad de 7 a 20 toneladas. Para cada material se calculó la distancia en kilómetros desde la ubicación del lugar de fabricación hasta el sitio de la obra. A partir de entrevistas a miembros del staff del proyecto se obtuvieron los consumos promedios de agua y electricidad para el tiempo de ejecución de 18 meses. Los equipos y la maquinaria considerados incluyeron el grupo electrógeno necesario para el funcionamiento de la grúa, la bomba estacionaria para el concreto y la excavadora hidráulica empleada durante el movimiento de tierras. También se consideró la manufactura de la maquinaria y los equipos usados temporalmente en obra como el encofrado metálico y la grúa torre. En ambos casos se incluyó la fabricación del metal usado en su manufactura y la fracción del tiempo de vida que pasó en obra. Debido a falta de información no se consideró la mano de obra ni el transporte del personal durante la etapa de construcción.

b. Etapa de uso

Esta se dividió en la operación y el mantenimiento del edificio. En la operación se estableció un tiempo de vida útil de 50 años y el consumo eléctrico y de agua potable durante ese periodo. Para el consumo eléctrico se consideró el proceso de Ecoinvent que contiene la matriz de generación eléctrica peruana del año 2014 (Moreno et al., 2017) y se seleccionó un suministro de medio voltaje de acuerdo a las especificaciones técnicas del proyecto. El proceso elegido incluyó desde la distribución del voltaje de media tensión hasta su llegada al usuario final incluyendo las pérdidas durante la distribución. El proceso de Ecoinvent estuvo basado en los datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) que se muestran en la Figura 4.5.

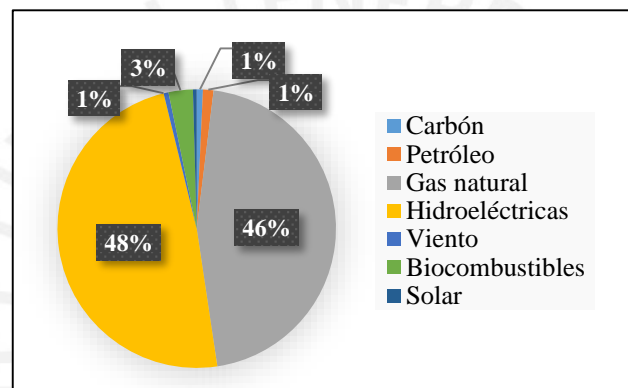


Figura 4.5: Fuentes de generación eléctrica en el Perú del año 2014
Fuente: IEA (2019)

El valor del consumo eléctrico mensual del edificio fue obtenido a partir de los recibos que entrega la empresa proveedora del servicio, pero como no se contaba con los valores de todos los meses ni el detalle del consumo de los diferentes aparatos se decidió modelar el consumo energético en el software eQUEST. Esta herramienta de libre uso fue desarrollada hace más de 25 años con apoyo del Departamento de Energía de Estados Unidos (USDOE por sus siglas en inglés) y las compañías de la industria eléctrica y de gas de ese país (James J. Hirsch y Asociados, 2004). El software utiliza el modelador DOE-2 para su funcionamiento y resulta muy útil debido a la facilidad para ser usado incluso por personas que no poseen experiencia (Energy Design Resources, s.f.). La versión empleada en este estudio fue eQUEST 3.65.

En el software se ingresó una base de datos del clima de Lima, el horario de trabajo del personal (lunes a viernes de 9 a 6pm y sábados de 8 a 12pm), el tipo de sistema HVAC (Variable Refrigerant Flow o VRF), las demandas eléctricas del sistema de iluminación LED de acuerdo al tipo de ambiente y el área de cada uno de ellos. Estos incluyeron la zona de recepción, las

oficinas privadas, las oficinas generales, los pasadizos, los estacionamientos y los servicios higiénicos. El muro cortina de la fachada frontal fue incluido, así como las mamparas de la fachada posterior que iban desde el primer hasta el último piso. Los resultados obtenidos del modelamiento fueron contrastados con el consumo real del edificio para verificar su precisión. En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos para todos los meses del año. El consumo eléctrico anual fue 439160 kWh y fue el resultado de la suma de las demandas energéticas del sistema de aire acondicionado, la ventilación, la iluminación, los equipos de escritorio y aquellos equipos necesarios para el funcionamiento del edificio. Cabe resaltar que el edificio no posee un sistema de calefacción.

Tabla 4.1: Datos del consumo eléctrico del edificio de oficinas. Unidades en 10^3 kWh

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Aire acondicionado	14.30	13.75	15.87	11.37	6.86	3.68	2.35	2.41	2.41	4.20	6.34	11.55	95.09
Ventilación	2.47	2.26	2.52	2.58	2.58	2.41	2.58	2.63	2.36	2.58	2.30	2.47	29.74
Equipos	19.37	17.58	19.57	19.53	19.82	18.82	19.82	20.02	18.62	19.82	18.37	19.37	230.71
Iluminación	6.95	6.35	7.09	7.23	7.24	6.79	7.24	7.38	6.65	7.24	6.51	6.95	83.62
Total (x 10^3 kWh)	43.09	39.94	45.05	40.71	36.50	31.70	31.99	32.44	30.04	33.84	33.52	40.34	439.16

Fuente: Adaptado de eQUEST 3.65

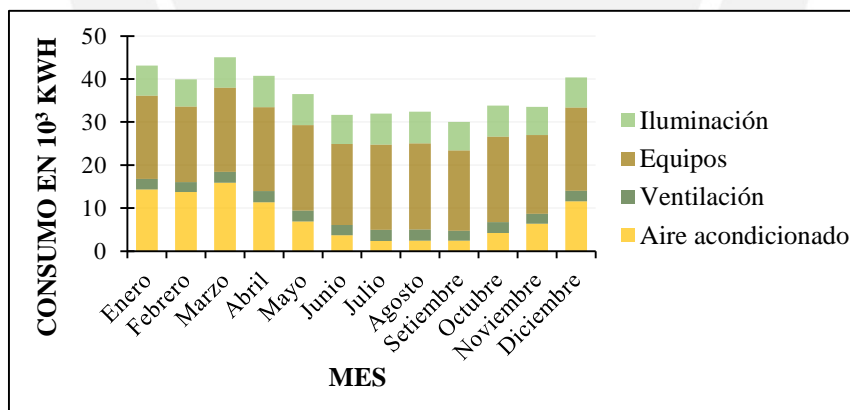


Figura 4.6: Consumo eléctrico en 10^3 kWh del edificio de oficinas

Fuente: Adaptado de eQUEST 3.65

Como se puede ver en la Figura 4.6, las demandas de energía eléctrica no varían sustancialmente en las categorías de ventilación, equipos e iluminación. Sin embargo, el uso del sistema de aire acondicionado sí afecta los consumos totales de cada mes. Los resultados muestran que durante los meses de julio y agosto se presenta un consumo menor del sistema de aire acondicionado, mientras que, desde el mes de diciembre hasta marzo, el consumo se

incrementa de manera notable, lo cual coincide con las estaciones de invierno y verano, respectivamente.

El proceso empleado para el consumo de agua potable inicia cuando el agua ya ha sido tratada y se encuentra lista para ser distribuida, y termina cuando el agua llega al usuario final. El proceso elegido utiliza el sistema convencional para el tratamiento de agua, lo cual coincide con el sistema empleado en Perú, el cual incluye la remoción de objetos, el uso de cloro como desinfectante y la filtración con arena para remover impurezas. El consumo de agua fue obtenido a partir de información brindada por la empresa proveedora y resultó ser 30 m³ al mes en promedio. El agua demandada fue utilizada en los servicios higiénicos y para el cuidado de los jardines.

c. Etapa de fin de vida

Esta etapa incluyó la demolición y el transporte de los escombros a un relleno autorizado. No se consideró el reciclaje de ningún material proveniente de la demolición, debido a que esta práctica no está tan difundida en el país.

La tesis realizada por Aguilar y Loo (2017) fue tomada como referencia para realizar las estimaciones de esta etapa. Dicha investigación consistió en la realización del ACV de la etapa de demolición de un pabellón universitario ubicado también en la ciudad de Lima. El proceso de demolición consistió en el uso de una excavadora de oruga que derribó la estructura por partes y en el uso de camiones cisterna de agua con una capacidad de 5000 galones para controlar la emisión de partículas al aire (Aguilar & Loo, 2017). La estimación de la cantidad de escombros obtenidos luego de la demolición fue hallada a partir del método planteado en el libro “Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste” (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Tabla 4.2: Ratios para la estimación del volumen de escombros generados durante la demolición de un edificio expresados en m³/m²

Tipo de construcción	Pesado: Albañilería, concreto, etc		Liviana: Prefabricados, drywall, etc	
	Residencial	No Residencial	Residencial	No Residencial
Construcción nueva	0.12-0.14	0.10-0.12	0.02-0.03	0.02-0.03
Rehabilitación	0.30-0.40	0.25-0.35	0.10-0.15	0.09-0.10
Demolición	0.80-1.00	1.00-1.20	0.50-0.70	0.70-0.80

Fuente: Adaptado de Pacheco-Torgal (2013)

El proceso descrito anteriormente fue adoptado para el edificio de oficinas. A partir de la Tabla 4.2 se obtuvo el factor de 1.2 para la demolición de edificios no residenciales de concreto

armado y luego el factor se multiplicó por el área techada total (6440 m²). El tiempo de demolición del edificio de referencia fue 0.08 horas/m² (Aguilar & Loo, 2017) y ese valor fue tomado para calcular las horas que se requerirían para el edificio de oficinas. Para el presente estudio se estimó un tiempo de 68 días (8 horas diarias), 7728 m³ de escombros y 3861 m³ de agua para controlar el polvo. Los residuos serían transportados en camiones de 20 m³ a un relleno autorizado llamado Arenera San Martín ubicado a una distancia de 20 km del sitio de la obra (Ver Figura 4.7).

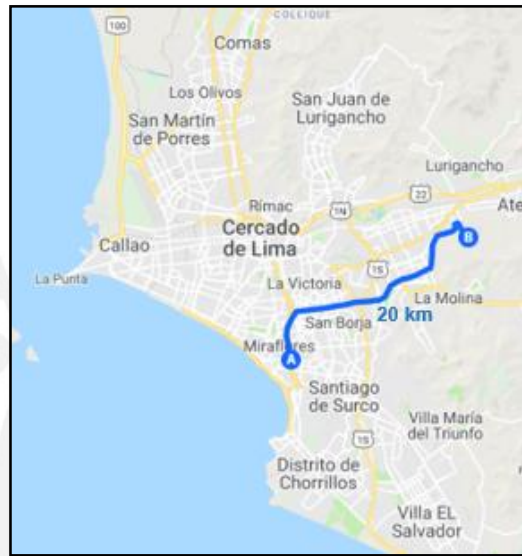


Figura 4.7: Distancia del edificio de oficinas (A) respecto al relleno autorizado (B)
Fuente: Google Maps

4.3.1. Procesos incluidos en el sistema

En la Tabla 4.3 se muestra el listado de todos los elementos incluidos en el sistema y el nombre del proceso seleccionado de la base de datos de Ecoinvent. La cantidad total de elementos incluidos en el estudio fue 47 y los procesos que se usaron para todo el ciclo de vida fueron 36 en total. Cabe resaltar que en la producción de los materiales de construcción que son fabricados localmente se incluyó la matriz de generación eléctrica peruana. Además, en el mortero y el concreto se reemplazó el cemento original por la producción peruana de cemento Portland.

Tabla 4.3: Procesos incluidos en el inventario

ELEMENTO	PROCESO EN ECOINVENT
Accesorios de acero inoxidable	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Accesorios de aluminio	Aluminium, cast alloy {GLO} aluminium ingot, primary, to market
Accesorios de bronce	Bronze {RoW} production
Accesorios de latón	Brass {CH} production
Accesorios sanitarios	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Accesorios sanitarios	Bronze {RoW} production
Acero de refuerzo	Reinforcing steel {RoW} production
Agua potable	Tap water {RoW} market for
Aparatos sanitarios	Sanitary ceramics {CH} production
Baldosa	Glass fibre {RER} production
Bloque de concreto	Concrete block {DE} production
Bomba concreto	Machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state {GLO}
Camión 20 m ³	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}
Camión 7.5-16 m ³	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}
Cemento Portland	Cemento Portland {PE} producción
Cerco metálico	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Cerrajería	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Concreto f'c = 175 kg/cm ² con cemento Portland peruano	Concrete, 20MPa {CA-QC} concrete production
Concreto f'c = 210 kg/cm ² con cemento Portland peruano	Concrete, 20MPa {CA-QC } concrete production
Concreto f'c = 245 kg/cm ² con cemento Portland peruano	Concrete, 25MPa {CA-QC } concrete production
Continúa	

ELEMENTO	PROCESO EN ECOINVENT
Continúa	
Concreto f'c = 280 kg/cm ² con cemento Portland peruano	Concrete, 30-32MPa {CA-QC } concrete production
Concreto f'c = 350 kg/cm ² con cemento Portland peruano	Concrete, 35MPa { CA-QC } concrete production
Conductores de cobre	Cable, unspecified {GLO} production
Drywall	Gypsum plasterboard {RoW} production
Electricidad voltaje medio	Electricity, medium voltage {PE} market for
Encofrado metálico	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Excavadora hidráulica	Excavation, hydraulic digger {RoW} processing
Grúa	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Grupo electrógeno	Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators {GLO}
Ladrillo de tecnopor	Polystyrene, expandable {RoW} production
Ladrillo pastelero	Roof tile {RER} production
Lana de roca	Stone wool, packed {RoW} stone wool production, packed
Lana de vidrio	Glass wool mat {CH} production, Saint-Gobain ISOVER SA
Luminarias	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW}
Marco de aluminio	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K {RoW}
Mixer 8 m ³	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}
Mortero	Cement mortar {CH} production
Pegamento porcelanato	Cement mortar {CH} production
Pintura	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RER}
Porcelanato	Ceramic tile {CH} production
Continúa	

ELEMENTO	PROCESO EN ECOINVENT
Continúa	
Proceso de templado	Tempering, flat glass {RoW} processing
Puerta cortafuego	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Puerta de madera	Door, inner, wood {RER} production
Puerta seccionable	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production
Relleno puerta seccionable	Polyurethane, rigid foam {RoW} production
Tuberías y accesorios de PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW} polyvinylchloride production
Vidrio	Flat glass, coated {RoW} production

Fuente: Elaboración propia

4.4. Análisis de sensibilidad

Los escenarios analizados estuvieron basados en una resolución directoral emitida por el Ministerio de economía y finanzas de Perú que fue elaborada para calcular la depreciación de edificios públicos (MEF, 2014). En este documento se indica que el tiempo de vida útil de una edificación construida a base de concreto armado oscila entre los 50 y 80 años (Ver Tabla 4.4). Por ello, el escenario base elegido tuvo 50 años de vida útil (escenario 1), el cual también es el valor más usado en la literatura (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019). Adicionalmente, se incluyó un segundo escenario con 30 años (escenario 2) para analizar el efecto que tendría una reducción en el tiempo de vida. Ese valor fue seleccionado porque es uno de los mínimos periodos de tiempo que ha sido empleado en los ACV de edificios (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019). El último escenario tuvo como tiempo de vida útil el valor de 80 años (escenario 3) establecido por el ministerio.

Tabla 4.4: Vida útil y tasa lineal de depreciación de edificios públicos

Tipo de material	Rango de vida útil (años)	Tasa lineal de depreciación (%)
Concreto/Ladrillo/Acero y otros materiales equivalentes	50 - 80	1.25 - 2
Adobe, madera, quincha y otros materiales equivalentes	33	3

Fuente: Resolución directoral N°006-2014-EF-51.01 (MEF, 2014)

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Consumo energético del edificio

El consumo de energía total de la edificación fue 2.23×10^5 GJ, tal como se observa en la Tabla 5.1. La etapa de uso fue la más resaltante en cuanto a consumo de energía primaria, porque demandó el 85% del total. La operación del edificio demandó la mayor parte debido al consumo eléctrico empleado para el funcionamiento del edificio, tal como se puede ver en la Figura 5.1. El uso de equipos electrónicos fue lo que requirió el 52% de la energía eléctrica anual, seguido del sistema HVAC con 29% y la iluminación del edificio con 19%. Por el contrario, la demanda de agua potable no resultó considerable. En este estudio, solo se consideró el pintado de la edificación cada 5 años y el transporte de la pintura para la fase de mantenimiento, por lo que el consumo energético durante esa etapa solo demandó el 1% de la demanda energética total.

Tabla 5.1: Consumo de energía primaria en GJ para cada etapa del ciclo de vida

Pre-uso		Uso		Fin de vida	Total (GJ)
Manufactura	Construcción	Operación	Mantenimiento		
2.78×10^4	3.44×10^3	1.88×10^5	3.18×10^3	5.19×10^2	2.23×10^5

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar estuvo la etapa de pre-uso a la que se le atribuyó el 15% de la energía total. La manufactura de materiales demandó el 89% de la energía de esa etapa y el 13% respecto al ciclo de vida total. La construcción de la estructura de los sótanos y la torre, así como la fase de acabados fueron las etapas más importantes debido a materiales como el concreto armado y el vidrio. El acero de refuerzo, el concreto y el vidrio demandaron el 34%, 23% y 20%, respectivamente, de la energía total asociada a la etapa de manufactura. El vidrio fue uno de los materiales que tuvo mayor masa (27 tn) durante la etapa de acabados del edificio, debido a que la edificación posee un muro cortina en toda la fachada frontal. Mientras que el concreto premezclado ($3508 \text{ m}^3/8238 \text{ tn}$) y el acero de refuerzo (397 tn) fueron los materiales más usados en la estructura.

Si bien la manufactura de materiales fue lo que sobresalió más en el pre-uso, la construcción demandó el 11% de la energía de esa etapa. El uso de combustibles fósiles para el transporte de materiales fue el factor determinante, puesto que requirió el 76% de la energía asociada a esa etapa. El uso de maquinaria estuvo en segundo lugar de importancia con 18% y, por último, estuvieron el uso de electricidad y agua que requirieron solo el 6% en total. La demanda de

energía eléctrica no fue tan resaltante durante la construcción en comparación con la etapa de operación, debido a que el tiempo de ejecución del proyecto fue solo de 18 meses.

Por último, el fin de vida tuvo una demanda de 5.19×10^2 GJ que resultó casi despreciable en comparación con las etapas anteriores y solo representó el 0.2% respecto al ciclo de vida total. El transporte de escombros fue la actividad más relevante, porque demandó el 82% de la energía total de esa etapa debido al combustible usado en los camiones. Mientras tanto, la demolición del edificio solo requirió el 18% debido el uso de la excavadora hidráulica.

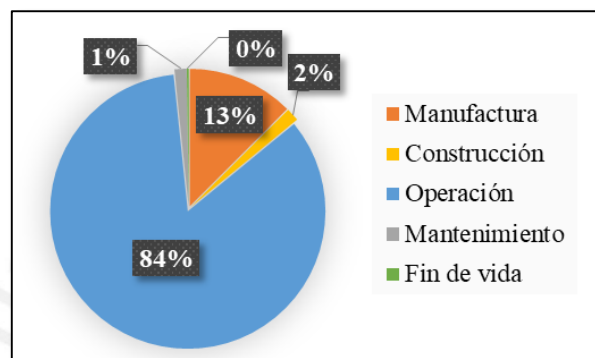


Figura 5.1: Distribución del consumo de energía primaria según las etapas del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia

5.2. Impactos ambientales del edificio

En la Tabla 5.2 se puede ver la cantidad de emisiones generadas durante cada etapa del ciclo de vida para las diez categorías de impacto analizadas. La etapa de pre-uso predominó en seis de las diez categorías ambientales debido a la manufactura de materiales, tal como se observa en la Figura 5.2. Estas fueron las categorías de acidificación, eutrofización, sustancias cancerígenas y no cancerígenas, efectos respiratorios y ecotoxicidad.

Al acero de refuerzo, el concreto y el vidrio se les atribuyeron más del 60% de las emisiones relacionadas a las categorías de agotamiento de ozono, potencial de calentamiento global, formación de smog, acidificación, sustancias cancerígenas, efectos respiratorios y agotamiento de combustibles fósiles. Mientras que en la categoría de eutrofización, sustancias no cancerígenas y ecotoxicidad, los conductores de cobre usados en las instalaciones eléctricas destacaron con una emisión mayor al 30%. Al analizar la categoría de potencial de calentamiento global se encontró que el vidrio fue responsable del 16% de las emisiones de CO_2 equivalentes, mientras que el concreto y el acero fueron responsables del 34% cada uno. Como se mencionó anteriormente, estos tres materiales también fueron los que demandaron más energía y son los que están presentes en mayores cantidades dentro del edificio.

La fabricación del acero fue realizada mediante el uso de un horno eléctrico y tuvo su mayor impacto en la categoría de sustancias cancerígenas con 64%, lo cual estuvo relacionado con la producción de escoria. Este es un desecho generado en el horno luego de la fusión del hierro esponja y el acero reciclado. Adicionalmente, durante todo el proceso de producción del acero se utilizan combustibles fósiles como fuente de energía, lo cual genera la emisión de gases contaminantes. Las principales emisiones en la producción de acero peruano incluyen el NOx, SO₂, PM, Fe y Pb (Corporación Aceros Arequipa, 2018).

Debido al cemento, el concreto premezclado fue responsable del 41% de las emisiones de la categoría de formación de smog y del 34% de la categoría de potencial de calentamiento global y agotamiento de combustibles fósiles. El clinker es un componente esencial del cemento Portland cuya producción es la principal responsable de la huella ambiental de la manufactura del concreto premezclado, puesto que genera emisiones considerables de CO₂ producto de sus altas demandas energéticas (IEA; WBCSD, 2018). El proceso de clinkerización fue responsable del 61% de las emisiones relacionadas al potencial de calentamiento global durante la fabricación del cemento Portland peruano (Vázquez-Rowe et al., 2019), lo cual ocasionó que este último generara el 29% del CO₂ equivalente emitido durante toda la etapa de manufactura.

El edificio posee un muro cortina en su fachada y una cantidad considerable de vidrios y mamparas. Esto generó emisiones considerables en la categoría de acidificación (20%) debido a la producción de vidrio y los perfiles de aluminio necesarios para su instalación. Esto se debe principalmente a que se requieren altas temperaturas para fusionar los componentes que conforman el vidrio, lo cual causa la emisión de gases producto del uso de combustibles fósiles. Asimismo, las materias primas contienen partículas finas que generan material particulado cuando son manipuladas (Subhi, 2016). El vidrio templado empleado en la fachada, las ventanas y las mamparas también tuvo que ser sometido a procesos adicionales para incrementar su resistencia.

En la etapa de uso, la demanda eléctrica durante la operación del edificio generó que esta tuviera un mayor impacto en las categorías restantes de agotamiento de ozono, potencial de calentamiento de global y agotamiento de combustibles fósiles con más del 70%, mientras que en la categoría de formación de smog fue del 46%. La categoría de agotamiento de combustibles fósiles fue la que resaltó más, debido a que esta etapa fue responsable de la demanda del 89% del total de la energía producida con combustibles fósiles. El combustible más usado en esa categoría fue el gas natural, lo cual coincidió con la producción peruana del

año 2014, en el cual el gas natural tuvo un 46% de participación como fuente de generación eléctrica (IEA, 2019).

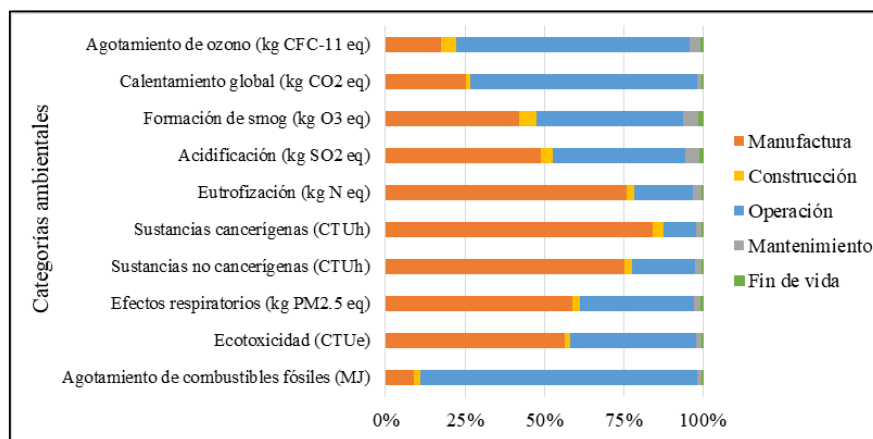


Figura 5.2: Distribución de las categorías de impacto según las etapas del ciclo de vida
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2: Impactos ambientales para cada etapa del ciclo de vida.

Categoría de impacto	Pre-uso (%)		Uso (%)		Fin de vida (%)	Total
	Manufactura	Construcción	Operación	Mantenimiento		
Agotamiento de ozono (kg CFC-11 eq)	17.6	4.6	73.9	3.3	0.7	1.0×10^0
Calentamiento global (kg CO ₂ eq)	25.2	1.5	71.4	1.6	0.3	1.1×10^7
Formación de smog (kg O ₃ eq)	42.0	5.6	46.2	4.8	1.3	4.2×10^5
Acidificación (kg SO ₂ eq)	49.1	3.6	41.7	4.8	0.8	2.7×10^4
Eutrofización (kg N eq)	76.1	2.3	18.3	2.9	0.3	1.4×10^4
Sustancias cancerígenas (CTUh)	84.3	3.4	10.2	2.0	0.2	9.0×10^{-1}
Sustancias no cancerígenas (CTUh)	75.4	2.3	19.8	2.3	0.3	2.7×10^0
Efectos respiratorios (kg PM _{2.5} eq)	58.8	2.5	35.7	2.5	0.5	5.8×10^3
Ecotoxicidad (CTUe)	56.5	1.8	39.6	1.9	0.2	8.9×10^7
Agotamiento de combustibles fósiles (MJ)	9.1	1.9	87.2	1.6	0.3	2.3×10^7

Fuente: Elaboración propia

En todas las demás categorías de la etapa de uso, la demanda eléctrica también influyó ampliamente. Si bien el gas natural es una alternativa más ecológica comparada con el carbón o el petróleo, este también genera gases de efecto invernadero durante su procesamiento en las centrales térmicas (Sarango, 2005). Algunos de los gases generados sobre todo en la fase de combustión son el carbono, el monóxido de carbono, el metano y el dióxido de nitrógeno (Sarango, 2005), los cuales contribuyeron en la generación de los impactos ambientales.

La construcción, el mantenimiento y el fin de vida fueron las etapas que destacaron menos dentro del ciclo de vida y en ambos casos se encontró que el transporte fue lo más relevante. La importancia se reflejó en la categoría de formación de smog donde dichas etapas del ciclo de vida tuvieron sus mayores contribuciones, aunque estas no superaron el 6% de las emisiones totales. El impacto del transporte puede deberse a que el proceso elegido para los camiones pertenece a la Euro III. Esta es una normativa europea que limita la emisión de gases producto del uso de combustibles en los vehículos. Dicha categoría está atrasada a nivel mundial en comparación con las nuevas versiones como la Euro VI. A pesar de ello, en el Perú la norma Euro III recién fue implementada desde el año 2015 para vehículos y camiones diésel (MINAM, 2016).

5.3. Análisis de sensibilidad del tiempo de vida útil

En los tres escenarios la operación demandó el 77-89% de la energía primaria y la manufactura de materiales, el 8-19%. El potencial de calentamiento global contribuyó con 61-79% en la operación y 12-36% en la etapa de manufactura. Los resultados demostraron que en los tres escenarios, la etapa de operación del edificio fue la más importante en cuanto a demanda energética y destacó en las categorías de agotamiento de ozono, potencial de calentamiento global y agotamiento de combustibles fósiles en los tres escenarios con más del 60% de las emisiones asociadas. En el escenario 3 donde el tiempo de vida fue mayor, disminuyó la importancia de la etapa de pre-uso (manufactura de materiales y construcción) y el fin de vida, mientras que en el escenario 2 sucedió lo contrario. No obstante, la manufactura generó más del 60% de las emisiones de las categorías de sustancias cancerígenas, sustancias no cancerígenas y eutrofización en los tres escenarios.

Las categorías de consumo de energía primaria y agotamiento de combustibles fósiles fueron las que tuvieron mayores variaciones en todo el ciclo de vida, lo cual era de esperarse porque la etapa de operación demandó la mayor cantidad de energía eléctrica cuya generación está directamente asociada a esas categorías. En el escenario 2 (Ver Figura 5.4) dichas categorías

se redujeron en 34% y 36%, mientras que en el escenario 3 (Ver Figura 5.5) se incrementaron en 51% y 53%, respecto al escenario 1 que se muestra en la Figura 5.3. Por otro lado, la categoría de emisión de sustancias cancerígenas fue la que estuvo menos afectada debido a que la etapa de manufactura fue responsable de la mayor cantidad de emisiones asociadas a esa categoría y esta se mantuvo constante en todos los escenarios. En el escenario 2 disminuyó en 5%, mientras que el escenario 3 aumentó en 7%. La etapa de mantenimiento también se vio afectada en el análisis. En el escenario 3, esta etapa tuvo su mayor incidencia con 6% en la formación de smog y acidificación, porque a medida que incrementa el tiempo de vida de la edificación, también aumenta el número de renovaciones que se deben realizar en el edificio. No obstante, comparado con las etapas de operación y manufactura, su contribución continuó siendo mucho menor al igual que las etapas de construcción y fin de vida.

En general, la etapa de operación fue la que demandó la mayor cantidad de energía primaria en todos los casos y en el escenario 3, también generó la mayor cantidad de emisiones. Por otro lado, la etapa de manufactura fue la segunda más importante en cuanto a consumo energético, pero fue responsable de la mayor parte de las categorías ambientales analizadas en los escenarios 1 y 2.

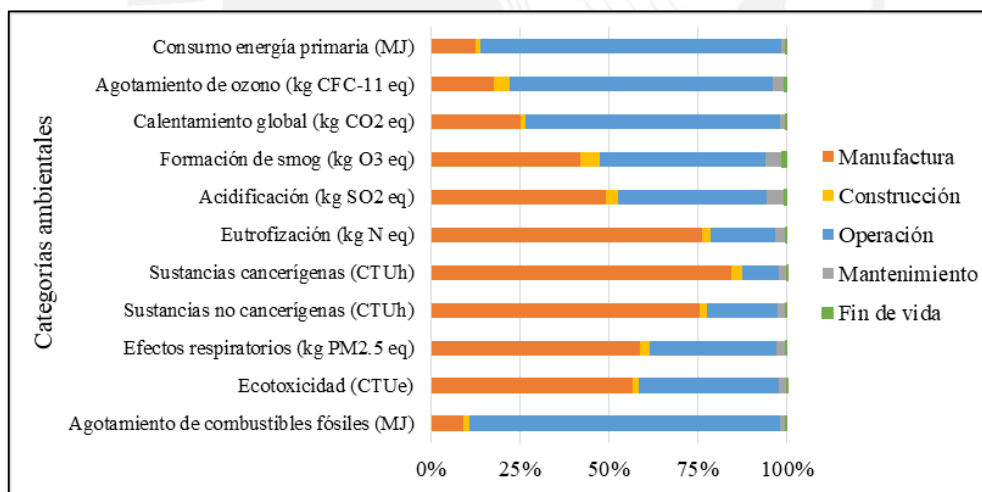


Figura 5.3 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 1 (50 años)
Fuente: Elaboración propia

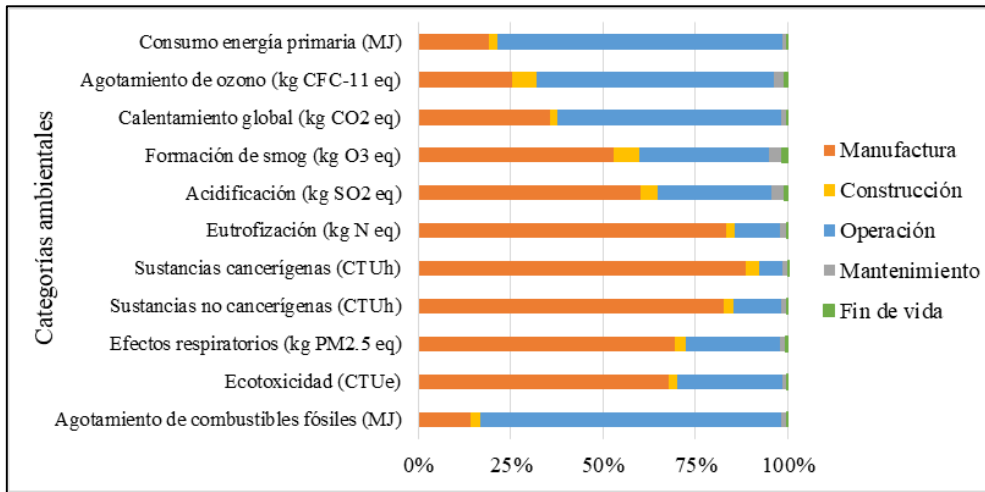


Figura 5.4 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 2 (30 años)

Fuente: Elaboración propia

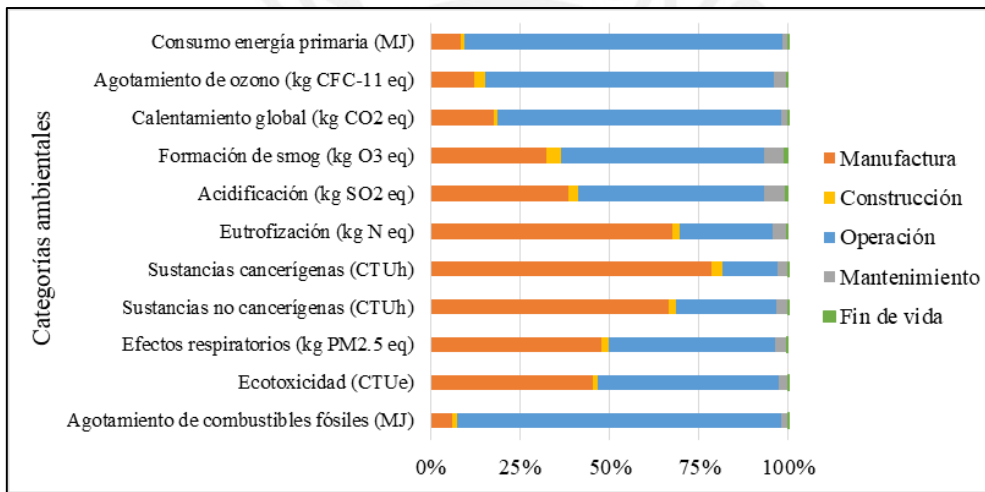


Figura 5.5 Distribución de las categorías de impacto para el escenario 3 (80 años)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En primer lugar, se contrastaron los resultados hallados para el edificio de oficinas con dos edificios residenciales ubicados también en la ciudad de Lima (Perú) de la tesis de licenciatura de Cáceres (2016). Luego, los resultados fueron comparados con estudios que emplearon el ACV en edificios de oficinas de otros países. Finalmente, se discutieron posibles medidas de mitigación para reducir la carga ambiental de este tipo de edificios.

6.1. Comparación con edificios residenciales ubicados en Lima

El estudio de Cáceres (2016) analizó dos edificios multifamiliares pertenecientes a diferentes sectores socioeconómicos: modelo 1 y modelo 2, los cuales en este estudio fueron nombrados residencial 1 y residencial 2, respectivamente. El consumo de energía primaria total del edificio residencial 1 fue 24 GJ/m², 25 GJ/m² del residencial 2 y 35 GJ/m² del edificio de oficinas. En los edificios residenciales, la etapa de pre-uso tuvo una demanda del 48-60% de la energía mientras que en el edificio de oficinas esta solo fue del 15%. Por otro lado, la etapa de uso demandó el 85% de la energía en el edificio empresarial, mientras que en los edificios residenciales esto solo fue 40-51%.

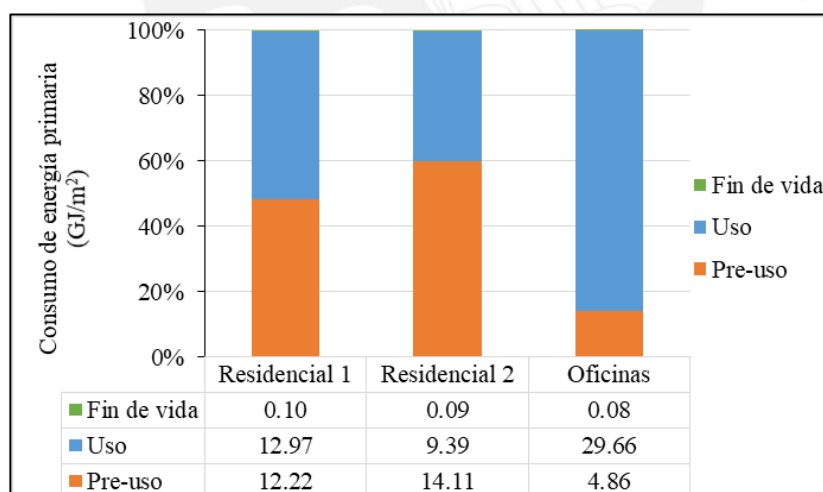


Figura 6.1: Comparación del consumo de energía primaria en GJ/m² de los edificios ubicados en Lima
Fuente: Elaboración propia

Las diferencias en la etapa de uso se deben a que en el edificio de oficinas la utilización de equipos electrónicos e iluminación es más frecuente durante el día. El edificio de oficinas demandó en promedio 6 kWh/m² de electricidad al mes, lo cual resultó ser el doble y el triple de lo requerido por el edificio residencial 1 y 2, respectivamente. Esto se tradujo en mayores requerimientos de energía primaria y emisiones de CO₂ equivalente en el edificio de oficinas.

Adicionalmente, en los edificios residenciales se utilizó una matriz de generación eléctrica correspondiente al año 2008, en la cual las hidroeléctricas eran responsables del 58% de la producción nacional y el gas natural solo del 28%. Por otro lado, en el presente estudio se utilizó la matriz energética del año 2014 que posee una participación de 48% de las hidroeléctricas y 46% del gas natural. El uso de combustibles fósiles se incrementó y, por lo tanto, también los impactos ambientales asociados a ello.

El equipamiento en ambos tipos de edificios también influyó en los resultados de la etapa de uso. Los edificios de oficinas como el del presente estudio poseen sistemas de aire acondicionado y ventilación dentro de sus instalaciones, en cambio los edificios residenciales no los utilizan. Esto debido a que en Lima la temperatura durante el año varía entre los 15 y 26°C (SENAMHI, 2018), lo cual no hace necesaria la implementación de esos equipos en las viviendas porque incrementaría mucho el costo de los servicios. Por el contrario, los edificios residenciales ubicados en países con climas más extremos que requieren equipos de climatización, la etapa de uso cobra una mayor importancia que el pre-uso (Bawden & Williams, 2015).

En la etapa de pre-uso, la manufactura de materiales como el concreto y el acero de refuerzo empleado en la estructura de los tres edificios fue lo más importante en cuanto a consumo energético y a emisiones de CO₂ equivalente, lo cual era de esperarse porque es el material predominante en los edificios limeños y son materiales altamente contaminantes. Sin embargo, en el edificio de oficinas, el vidrio usado en el muro cortina de la fachada y en las ventanas y mamparas también tuvo un impacto importante por la cantidad de material empleado. El muro cortina es un tipo de acabado frecuente en este tipo de edificaciones, a diferencia de los edificios residenciales. Los procesos involucrados en la manufactura del vidrio, así como las materias primas empleadas fueron responsables de emisiones considerables al ambiente, especialmente en las categorías de potencial de calentamiento global y acidificación.

Los edificios multifamiliares tuvieron una demanda similar de energía en el pre-uso, a diferencia del edificio de oficinas. Esto puede atribuirse a que este último tuvo un menor ratio de concreto (0.52 m³/m²) que el edificio residencial 2 (0.67 m³/m²), a pesar de que posee mayor área construida y el mismo sistema estructural de pórticos y placas de concreto armado. En el caso del edificio residencial 1, este fue construido con un sistema de ductilidad limitada constituido por muros angostos con espesores de hasta 15 cm (Cáceres, 2016), por ello, su consumo energético fue menor al del edificio de oficinas y al edificio residencial 2. La cantidad

de material empleado en el edificio de oficinas pudo verse afectada por el uso de vigas postensadas en su estructura. Estas fueron requeridas para alcanzar grandes áreas libres en algunos ambientes de oficinas, lo cual ocasionó que el número de columnas se redujera, así como la cantidad de concreto armado. Este sistema permite reforzar los elementos estructurales con tendones de acero de alta resistencia. De esta manera, se puede incrementar la distancia entre los puntos de apoyo, de las vigas en este caso, para que los ambientes tengan más espacios libres (Thayapraba, 2014).

En los tres edificios, el pre-uso fue la etapa más relevante en las categorías de acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, sustancias cancerígenas y no cancerígenas. Esto como consecuencia de las emisiones generadas al ambiente durante la manufactura de los materiales. Tanto el edificio residencial 1 como el 2, tuvieron sus mayores emisiones de CO₂ equivalente durante la etapa de pre-uso; sin embargo, al comparar los resultados con el edificio de oficinas, este resultó menor (Ver Figura 6.2), lo cual puede atribuirse a la menor cantidad de energía demandada durante esa etapa por el menor ratio de concreto. A pesar de las diferencias en el potencial de calentamiento global, el pre-uso fue responsable de la mayor cantidad de impactos ambientales en los tres casos. De las diez categorías analizadas con TRACI, el pre-uso destacó en 8-10 categorías en los edificios residenciales y en 6 categorías en el edificio de oficinas.

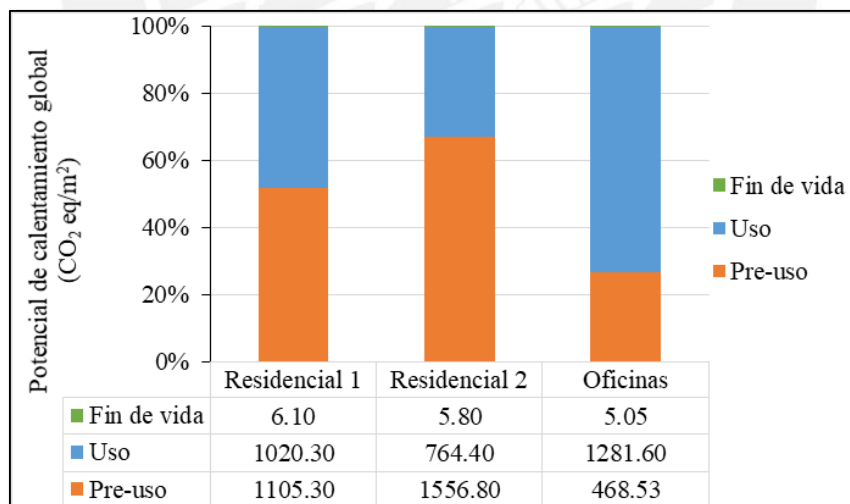


Figura 6.2: Comparación de la emisión de kg de CO₂ eq/m² de los edificios ubicados en Lima
Fuente: Elaboración propia

En la etapa de fin de vida, los tres edificios tuvieron resultados similares y casi despreciables en comparación con las demás etapas, tal como se puede ver en la Figura 6.1. Las mayores emisiones estuvieron en las categorías de agotamiento de ozono y combustibles fósiles para los edificios residenciales, mientras que en el edificio de oficinas sobresalió la categoría de

formación de smog. Todas las categorías ambientales estuvieron asociadas a los gases generados producto de los combustibles fósiles usados en los camiones para el traslado de los escombros. No obstante, el edificio de oficinas tuvo el menor consumo de energía y generó menos emisiones, lo cual puede atribuirse a que la distancia de transporte hacia el relleno para la disposición final de los escombros fue menor (19 km) que la de los edificios residenciales (30 km).

6.2. Comparación con edificios de oficinas de otros países

Los resultados del edificio ubicado en Lima fueron comparados con estudios de ACV realizados en Finlandia (Junnila et al., 2006), Estados Unidos (Junnila et al., 2006) y China (Huijun et al., 2012). Las etapas del ciclo de vida incluidas fueron divididas en la manufactura, la construcción, la operación, el mantenimiento y el fin de vida. Por ello, se analizará por separado cada una de dichas etapas. El edificio ubicado en China fue el único que no incluyó el mantenimiento como parte del ciclo de vida. En todos los edificios se consideró un tiempo de operación de 50 años, además de un sistema estructural de pórticos y placas de concreto armado.

a. Etapa de manufactura

Los valores hallados para la manufactura demostraron que esta etapa demanda entre 6-13% de la energía primaria y fue responsable de la emisión de 4-25% del CO₂ equivalente. Los materiales que más influyeron fueron el concreto premezclado y el acero de refuerzo usado en la estructura de todos los edificios, aunque el acero empleado en las instalaciones también tuvo una contribución importante en el caso de Estados Unidos. En China, el concreto y el acero generaron el 49% y el 17% del CO₂ equivalente, respectivamente (Huijun et al., 2012). En Perú, el concreto y el acero de refuerzo fueron responsables de la emisión del 34% del CO₂ equivalente cada uno. El concreto y el acero usados en el edificio de Finlandia fueron responsables de la generación del 35% y el 3% de las emisiones durante la manufactura. En Estados Unidos se generó la menor cantidad de CO₂ equivalente con 11% para el concreto y 12% para el acero de refuerzo (Junnila et al., 2006).

En Perú y China, la manufactura tuvo una proporción similar (12-13%) en el consumo energético dentro del ciclo de vida, a diferencia del resto de países tal como se puede ver en la Figura 6.3. Esto puede deberse a la variabilidad que existe en la sismicidad de cada región. Todos los edificios están hechos a base de concreto armado, sin embargo, los edificios de Lima

(Perú) y Liaoning (China) se encuentran en zonas altamente sísmicas. Esto genera que se demande una mayor cantidad de material para reforzar las estructuras y que se incremente la importancia de esta etapa. La altura de los edificios y el área construida también pudo influir en la demanda de material (Bawden & Williams, 2015). El edificio ubicado en China tiene 13 pisos y tuvo el mayor potencial de calentamiento global y demanda energética, mientras que sucedió lo contrario en el edificio de Finlandia con 4 pisos, tal como se puede ver en la Tabla 6.2.

En cuanto a las emisiones de CO₂, en Perú el potencial de calentamiento global de esta etapa tuvo una mayor proporción en comparación con los demás países, a pesar de que el valor de la emisión es similar (Ver Figura 6.4). Esto puede deberse a que la etapa de operación del edificio peruano tuvo una menor emisión que los demás países, lo cual incrementó la importancia de la etapa de manufactura. Adicionalmente, la diferencia en la emisión del CO₂ equivalente en los edificios también pudo estar relacionada a los procesos de fabricación de los materiales en cada uno de los países (Huijun et al., 2012). Por ejemplo, en algunos países está más difundido el uso de materiales cementantes suplementarios en la elaboración del cemento, lo cual disminuye las emisiones generadas por su fabricación. Estos materiales reemplazan al clinker usado en el cemento y reducen las emisiones relacionadas a su producción. El estudio realizado por Vázquez-Rowe et al. (2019) demostró que si los fabricantes del cemento Portland empleado en este estudio reemplazaran 40% del clinker por puzolanas, habría una reducción mayor al 30% en las emisiones de CO₂ equivalente por cada 42.5kg de cemento.

b. Etapa de construcción

Tal como se puede ver en la Figura 6.3, en todos los estudios la etapa construcción del edificio no fue tan resaltante durante el pre-uso en comparación con la manufactura de materiales. La demanda energética y la emisión de CO₂ equivalente de esta etapa solo fue 1-2% del total. Esta etapa duró entre un año (China) y un año y medio (Perú), lo cual contribuyó a que los impactos ambientales del uso de energía eléctrica fueran menores en comparación con la etapa de operación.

El uso de equipos fue lo que resaltó en los edificios de EEUU y Finlandia (Junnila et al., 2006), pero en los edificios de China y Perú, el transporte de materiales fue lo más relevante. En Finlandia y Estados Unidos, la categoría que más destacó para la etapa de construcción fue la generación de NO_x equivalente (6-11% del total) y en Perú el mayor valor se obtuvo en la categoría de formación de smog (6% del total). En ambos casos, el impacto ambiental estuvo

relacionado al uso de combustibles fósiles para el funcionamiento de la maquinaria, ya sea por las horas de uso de los equipos o por la distancia que deben recorrer los camiones para transportar los materiales. El impacto del transporte en esta etapa no influye notablemente en los impactos de todo el ciclo de vida porque generalmente los materiales son fabricados localmente, sin embargo, si estos fueran en su mayoría importados, las emisiones serían más considerables (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013).

Tabla 6.1: Consumo energético en GJ/m² de los edificios de oficinas

	EEUU	Finlandia	China	Perú
Área (m ²)	4400	4400	36500	6440
Manufactura	7.07	3.41	8.43	4.32
Construcción	1.25	1.09	0.97	0.53
Operación	67.64	46.36	58.87	29.18
Mantenimiento	4.91	2.16	-	0.49
Fin de vida	0.75	0.18	0.19	0.08
Total (GJ/m²)	81.61	53.20	68.46	34.60

Fuente: Elaboración propia

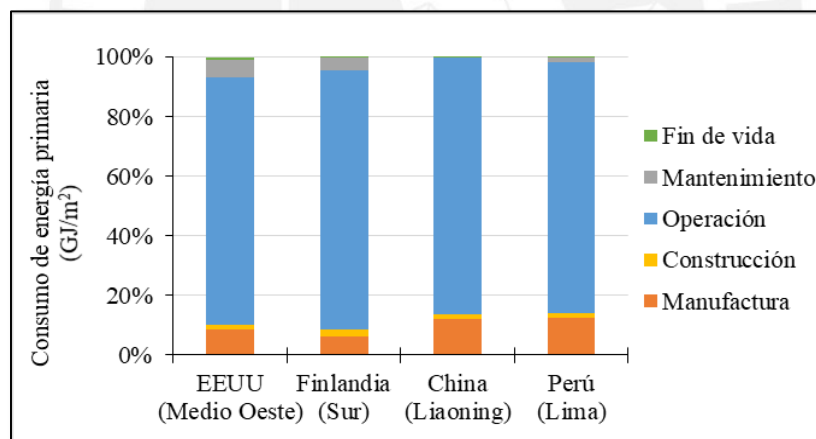


Figura 6.3: Comparación del consumo energético en GJ/m² de los edificios de oficinas

Fuente: Elaboración propia

c. Etapa de operación

Esta etapa fue la más importante en todos los estudios tal como se puede apreciar en las Figuras 6.3 y 6.4, porque fue responsable del 83-87% de la energía demandada durante todo el ciclo de vida y la emisión de 71-85% del CO₂ equivalente. El uso de electricidad para el funcionamiento de los equipos (HVAC, entre otros) y la iluminación fueron los factores más influyentes que tuvieron en común todos los edificios, aunque el uso de gas natural fue lo más importante en

Estados Unidos y la calefacción, en Finlandia. Por otro lado, el uso de agua no fue relevante en ninguno de los edificios.

Una de las diferencias encontradas entre los países estuvo relacionada al contexto climático. En todos los países se utiliza un sistema de aire acondicionado y ventilación, pero a diferencia del edificio ubicado en la capital peruana, en los demás países también utilizan sistemas de calefacción. Para analizar el efecto que genera su uso se restó el consumo de la calefacción en el edificio finlandés. La demanda energética durante la operación disminuyó de 46.36 a 23.64 GJ/m², lo cual representó una disminución del 49% respecto a su valor inicial y esto podría explicar la menor demanda de energía en el edificio peruano (Ver Tabla 6.1). En Estados Unidos dichos equipos consumen el 36% de la energía usada en los edificios comerciales (EPA, s.f.), sin embargo su uso es necesario en zonas donde las temperaturas son extremas. El edificio finlandés analizado está ubicado al sur del país donde la mínima temperatura durante el invierno puede descender hasta los -5°C (Climate Data, 2018), mientras que en Lima la temperatura mínima oscila alrededor de los 15°C (SENAMHI, 2018).

El tiempo de vida útil considerado en todos los edificios también es un factor que influye en las demandas energéticas e impactos de esta etapa (Janjua , Sarker, & Biswas, 2019). A todos los edificios se les consideró un periodo de 50 años, no obstante, si este fuera menor, las demás etapas cobrarían mayor protagonismo, aunque también podría darse el caso contrario. En un estudio realizado por Scheuer et al. (2003), la operación de un edificio de oficinas ubicado en Michigan requirió el 98% de la energía para un tiempo de 75 años. Esta demanda supera a todos los edificios analizados, incluyendo al de Estados Unidos que también pertenece al medio oeste de ese país y cuya demanda de energía fue del 83%. Los resultados del análisis de sensibilidad del edificio de oficinas peruano descrito en el capítulo anterior también mostraron incrementos y disminuciones tanto en los impactos ambientales como en la importancia de las etapas del ciclo de vida. No obstante, la etapa de operación se mantuvo como aquella que demanda la mayor cantidad de energía en todos los escenarios y la etapa de manufactura continuó siendo responsable del mayor número de impactos ambientales en dos de los tres escenarios analizados.

La generación eléctrica de cada país también influyó en los resultados. En la Tabla 6.2 se puede observar que el edificio chino fue el que tuvo mayores emisiones de CO₂ equivalente en esta etapa a pesar de que su consumo energético fue menor al del edificio estadounidense. Esto puede deberse a que la generación eléctrica en la región de Estados Unidos a la que pertenece el edificio, genera un menor impacto ambiental. Junnila et al. (2006) también destacaron la

influencia de la matriz, porque en dicho estudio las fuentes de generación eléctrica en Finlandia eran más limpias que las de Estados Unidos, lo cual se tradujo en menores emisiones durante la etapa de operación. En el 2017, el carbón generó el 68% de la electricidad en China, mientras que en Estados Unidos fue responsable del 28%, el cual estuvo detrás del gas natural con 34% (IEA, 2019). Los países más desarrollados como Estados Unidos y China utilizan mayores cantidades de combustibles fósiles. Por otro lado, en el mismo año, en Finlandia la energía nuclear fue responsable del 34% y las hidroeléctricas del 22% de la producción eléctrica. En Perú, el gas natural generó el 35% de la electricidad y las hidroeléctricas el 55% (IEA, 2019).

Tabla 6.2: Emisión de kg de CO₂ eq/m² de los edificios de oficinas

	EEUU	Finlandia	China	Perú
Área (m²)	4400	4400	36500	6440
Manufactura	455	295	715	442
Construcción	91	45	88	27
Operación	5045	2500	12951	1253
Mantenimiento	295	159	-	31
Fin de vida	45	14	2177	5
Total kg CO₂/m²	5930	3010	15932	1755

Fuente: Elaboración propia

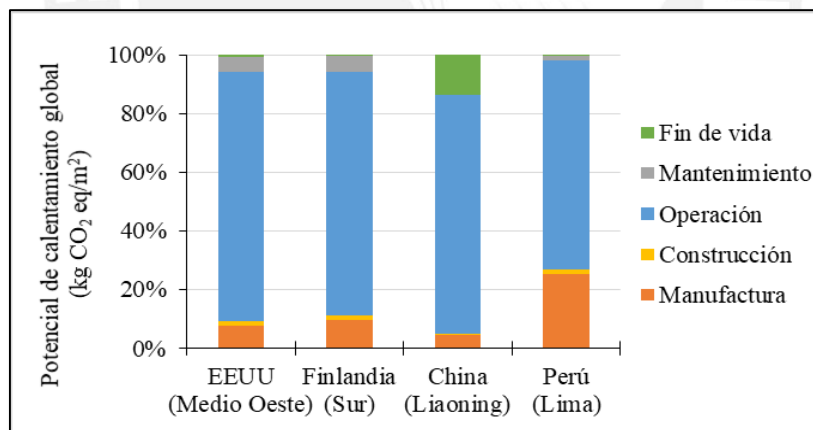


Figura 6.4: Comparación de la emisión de kg de CO₂ eq/m² de los edificios de oficinas

Fuente: Elaboración propia

d. Etapa de mantenimiento

El mantenimiento de los edificios representó entre 1-6% de la demanda de energía total y fue responsable de 2-5% de las emisiones de CO₂ equivalente. El edificio de EEUU tuvo el mayor valor, seguido del edificio finlandés y el edificio peruano. Este último fue el menor de todos, debido a que solo consideró el pintado de la edificación y el transporte de la pintura como parte del mantenimiento. Los demás estudios incluyeron el cambio de una mayor cantidad de

materiales, así como el uso de equipos para su instalación. Por ello, en los edificios de Estados Unidos y Finlandia, a esta etapa se le atribuyó el 15-23% del PM₁₀ equivalente generado. Las actividades que tuvieron mayores emisiones estuvieron relacionadas a la fabricación de los materiales que fueron renovados durante el todo tiempo de vida de los edificios. En Perú, lo que más destacó en esta etapa fue el transporte de la pintura y la categoría ambiental más resaltante fue la formación de smog (kg O₃ equivalente).

e. Etapa de fin de vida

En esta etapa la demanda de energía y las emisiones de CO₂ equivalentes fueron como máximo 1% del total. En todos los casos se incluyó el uso de maquinaria para la demolición y el transporte de escombros. Sin embargo, la demanda de energía y el potencial de calentamiento global del edificio peruano fueron considerablemente menores que en los demás países (Ver Tablas 6.1 y 6.2). Esto puede deberse a que las distancias para el transporte de los escombros de los edificios de Estados Unidos y Finlandia fueron más del doble que en Perú.

Para el caso estadounidense y finlandés, el uso del equipo de demolición fue lo que demandó la mayor cantidad de energía y emisiones de NO_x que superaron al CO₂ equivalente. En el caso peruano, el transporte fue lo que sobresalió y la categoría de formación de smog fue la más resaltante. Solo en China, esta etapa demostró ser la segunda más importante respecto a todo el ciclo de vida al ser responsable del 14% de las emisiones totales de CO₂ equivalente, a pesar de que su consumo de energía fue solo del 1%. Esto se debió a que consideró el tratamiento de los residuos provenientes de la demolición.

6.3. Posibles medidas de mitigación

Los resultados demostraron la importancia de los edificios de oficinas a lo largo de su ciclo de vida, por ello algunos estudios plantearon recomendaciones para mejorar su desempeño ambiental. Por ejemplo, según Bawden y Williams (2015), los hábitos de los ocupantes tienen un rol fundamental en la etapa de uso. Algunas medidas que pueden tener un efecto positivo incluyen modificar la temperatura del sistema de aire acondicionado (set point) o apagar la luz y los equipos de las oficinas cuando los ocupantes de una habitación no están presentes. En países como Tailandia donde el aire acondicionado demanda la mayor cantidad de energía durante la etapa de operación, esta medida tiene efectos considerables (Kofoworola & Gheewala, 2008).

Otros estudios plantean que el mejor momento para tomar medidas respecto al impacto de la etapa de operación es durante el diseño y la construcción del edificio (Sharma et al., 2011), porque allí se establecen las bases de su funcionamiento (Scheuer et al., 2003). El diseño bioclimático se plantea como una gran alternativa, puesto que este enfoque toma en cuenta las condiciones climáticas de la región para el diseño. De esta manera se pueden aprovechar los recursos naturales (viento, luz solar, entre otros) para satisfacer los requerimientos de confort de los ocupantes y reducir los requerimientos de energía (Olgyay, 1963) que son demandados por los sistemas de climatización. El edificio de oficinas peruano posee un muro cortina en la fachada, el cual no es considerado como la mejor solución bioclimática. Este tipo de fachada permite la captación de radiación solar; además, cuando no posee ventanas, evita el ingreso de vientos para la renovación del aire al interior del edificio (Merino, 2018).

Aunque es un proceso más complejo, el cambio a fuentes renovables para la generación eléctrica de los países también resulta fundamental debido a la gran demanda eléctrica para el funcionamiento de los edificios. Sin embargo, es importante resaltar que los cambios que se realicen deben tomar en cuenta todos los aspectos ambientales (Vázquez-Rowe et al., 2015). La reducción del uso de combustibles fósiles, disminuye las emisiones contaminantes, pero podría acarrear una mayor demanda de otros recursos, por lo que se debería analizar si ese impacto resulta menos perjudicial. En el caso de Perú, las hidroeléctricas podrían verse afectadas por la futura escasez de agua, por ello resultaría beneficioso incrementar la inversión en el uso de fuentes de energía solares y eólicas (Vázquez-Rowe et al., 2015). Mientras el cambio de las matrices nacionales de generación eléctrica está en proceso, Scheuer y colegas (2003) sugieren que en el diseño de los edificios se considere su adaptación hacia el uso de fuentes de energía renovables, puesto que los edificios tienen un tiempo de vida largo y con el avance tecnológico esto sería cada vez más factible. Por ejemplo, en México un estudio halló los beneficios de convertir un edificio convencional en uno eficiente, lo cual incluyó el uso de paneles fotovoltaicos para la generación de energía (Centro Mario Molina, 2014).

Por otro lado, la etapa de manufactura también fue considerable en el ciclo de vida del edificio. Algunos estudios plantearon como posibles mejoras la inclusión del pensamiento de ciclo de vida durante el diseño de los edificios, de tal forma que se minimice el uso de materiales altamente contaminantes, se fomente la elección de materiales reciclados o se seleccionen aquellos que no necesiten ser renovados frecuentemente (Scheuer et al., 2003). Esto último reduciría la demanda de energía de la etapa de mantenimiento, debido a que el cambio de los materiales se realizaría en periodos de tiempo más largos.

Para esa misma etapa, otras investigaciones sugieren la necesidad de promover leyes que exijan el uso de tecnologías más limpias para la fabricación de materiales (Huijun et al., 2012). La industria cementera, por ejemplo, es el tercer consumidor más grande de energía del sector industrial y emite el 7% de las emisiones globales (IEA, 2018). No obstante, en países como Perú que están en vías de desarrollo, los requerimientos de cemento se incrementarán inevitablemente. Por ello, las mejores alternativas serían la sustitución o la reducción del uso de clinker en el cemento y la implementación de medidas que permitan una mayor eficiencia energética durante su producción (Vázquez-Rowe et al., 2019).

El uso de combustibles fósiles para el transporte y el uso de maquinaria fueron los factores determinantes en las etapas de construcción, mantenimiento y fin de vida de los edificios analizados. Los resultados del edificio de oficinas peruano demostraron la importancia del transporte, lo cual se debió a la elección de camiones pertenecientes a la normativa Euro III. Para controlar las emisiones contaminantes que esto genera, Aguilar y Loo (2017) sugirieron la adopción de lineamientos europeos (norma Euro) para la elección de maquinaria. Asimismo, para disminuir los impactos ambientales de la etapa de construcción también se propone el uso de maquinaria en buen estado y el reúso de materiales temporales (Guggemos & Horvath, 2005).

En la etapa de fin de vida, el reciclaje se plantea como una de las mejores alternativas para contrarrestar los efectos negativos de los desechos generados luego de la demolición, además del uso de tratamientos de residuos que sean más amigables con el medio ambiente (Huijun et al., 2012). El reciclaje promueve la recuperación de los materiales, lo cual también reduce el uso de materias primas y el impacto ambiental de la etapa de manufactura. El acero, por ejemplo, es reciclado en grandes cantidades por sus fabricantes (AISC, 2018). Lamentablemente, en Lima existe un largo camino por recorrer en este aspecto, porque el 70% de los residuos provenientes de actividades relacionadas a la construcción o demolición terminan en lugares no autorizados (León, 2017), lo cual no permite su adecuado tratamiento.

CONCLUSIONES

Este estudio fue elaborado con el fin de identificar la etapa más importante dentro del ciclo de vida de un edificio de oficinas ubicado en la ciudad de Lima (Perú). Para ello se empleó la metodología de análisis de ciclo de vida normada por las ISO 14040 y 14044 por su carácter holístico y por ser una herramienta ambiental ampliamente reconocida.

Los resultados demostraron que la etapa de operación es la más relevante en cuanto a consumo de energía primaria, porque demandó el 84% del total, debido al uso de energía eléctrica para el funcionamiento del edificio en 50 años de vida útil. Los equipos y los aparatos electrónicos fueron responsables del 53% de esta demanda, seguido del uso de aire acondicionado con 22%. La segunda etapa más importante fue la manufactura de materiales, a la cual se le atribuyó el 13% de la energía total debido principalmente a la fabricación de materiales como el acero de refuerzo, el concreto premezclado y el vidrio empleados en la estructura y en los acabados.

Al analizar los impactos ambientales se encontró que la etapa de manufactura tuvo la mayor contribución en las categorías de acidificación, eutrofización, sustancias cancerígenas y no cancerígenas, efectos respiratorios y ecotoxicidad con más del 40%. La producción de cemento generó el 29% del CO₂ equivalente de esta etapa, el acero destacó con el 64% de la emisión de sustancias cancerígenas y el vidrio tuvo un 20% de participación en la categoría de acidificación. Mientras tanto, la etapa de operación causó más del 40% de las emisiones asociadas a las categorías de pérdida de la capa de ozono, potencial de calentamiento global, formación de smog y agotamiento de combustibles fósiles. Estos estuvieron asociados al uso de gas natural como una de las principales fuentes de generación eléctrica de la matriz peruana, debido a que este combustible fósil emite gases contaminantes al ambiente durante su procesamiento en las plantas termoeléctricas.

Por otro lado, las etapas de construcción, mantenimiento y fin de vida no resultaron tan sustanciales, puesto que solo requirieron hasta el 2% de la energía y se les atribuyó el 1- 6% de las emisiones relacionadas a la categoría de formación de smog. La actividad que influyó más en los resultados de esta etapa fue el transporte de los materiales y los escombros como consecuencia del uso de combustibles fósiles. En la etapa de construcción la demanda eléctrica no fue tan relevante por su corto periodo de duración (18 meses), en comparación con la etapa de operación (50 años).

Adicionalmente, un análisis de sensibilidad fue realizado con el fin de identificar el efecto que genera en el ciclo de vida, el aumento o la disminución del tiempo de vida útil del edificio. En los tres escenarios, la etapa de operación lideró tres categorías ambientales con más del 60% y demandó el 77-89% de la energía primaria, mientras que la manufactura destacó en cinco categorías con más del 40%. En el escenario con un tiempo de vida de 30 años, la manufactura de materiales, la construcción y el fin de vida incrementaron su importancia, mientras que en el escenario con 80 años de vida útil ocurrió lo contrario. Los resultados demostraron que el tiempo de vida útil tiene una influencia considerable en el impacto total de cada categoría, pero la etapa de operación siguió demandando la mayor cantidad de energía en todos los casos y en el escenario con 80 años de vida útil también fue la etapa que generó la mayor cantidad de emisiones. La manufactura fue responsable del mayor número de impactos ambientales en los escenarios con 30 y 50 años de vida útil y tuvo una demanda de energía de 8-19% en todos los escenarios.

Posteriormente, los resultados fueron comparados con estudios similares que analizaron edificios de oficinas de otras partes del mundo. En todos los casos, la operación sobresalió con una demanda de energía entre 83-87% y un potencial de calentamiento global entre 71-85%, siendo la demanda eléctrica el factor en común. Los elementos que contribuyeron más en las diferencias encontradas fueron el uso de calefacción en los países con climas extremos y las fuentes de generación eléctrica de cada país. La manufactura estuvo en segundo lugar con una demanda energética de 6-13% y una contribución de 4-25% del CO₂ equivalente total. Las diferencias en los edificios estuvieron relacionadas a las distintas tecnologías empleadas para la fabricación de los materiales, especialmente el concreto y el acero, así como a la cantidad de material empleado en el reforzamiento de la estructura debido al tamaño del edificio y a la actividad sísmica de cada país.

El edificio también fue comparado con dos edificios residenciales ubicados en Lima para determinar las principales variaciones en el ciclo de vida de ambos tipos de edificaciones. Los resultados mostraron que en los edificios residenciales la etapa de pre-uso fue la más importante porque demandó el 48-60% de la energía, mientras que el edificio de oficinas la etapa de uso demandó el 85% y la manufactura solo el 15%. En la etapa de uso las diferencias estuvieron dadas por la mayor demanda de energía eléctrica en las oficinas debido al uso constante de equipos electrónicos y por el equipamiento para los sistemas de aire acondicionado y ventilación que no poseen los edificios residenciales. Además, la disminución del uso de fuentes renovables en la matriz de generación eléctrica del edificio de oficinas

también influyó en las emisiones generadas. Por otro lado, en ambos tipos de edificios la manufactura fue responsable de la generación de una mayor cantidad de impactos ambientales. A pesar que los tres edificios están ubicadas en la misma ciudad, el tipo de sistema estructural empleado en cada uno contribuyó a que en el edificio de oficinas la demanda energética y el potencial de calentamiento global fueran menores. En todos los casos, los materiales más importantes fueron el concreto y al acero de refuerzo porque son los materiales que predominan en Lima para la construcción de edificios.

En Perú, no existen estudios que analicen de manera holística los impactos ambientales de un edificio de oficinas, por ello este estudio contribuye como una fuente de información valiosa para identificar las etapas más importantes en todo su ciclo de vida con el fin de plantear mejoras para disminuir su huella ambiental. El estudio encontró que existen diferencias con los edificios de oficinas de otros países, por ello para mejorar el desempeño de este tipo de edificaciones se debe analizar el contexto de cada país. Asimismo, identificó que existen diferencias con los edificios residenciales, a pesar de que ambos tipos de edificios están ubicados en la misma ciudad. En este caso los resultados demuestran que las medidas de mitigación deben estar enfocadas principalmente a las etapas de operación y manufactura. No obstante, al disminuir los impactos ambientales de esas etapas, la construcción, el mantenimiento y el fin de vida podrían cobrar una mayor relevancia, por ello también se deben implementar mejoras en esas etapas.

El cambio de la matriz energética durante los 50 años de operación no fue considerado por la incertidumbre que puede generar la proyección de esta. Además, por la limitación de información no se incluyó la manufactura de los equipos del sistema HVAC, el transporte de las personas, la renovación de una mayor cantidad de materiales durante la etapa de mantenimiento, la generación de residuos durante la operación y el tratamiento de los desechos, pero se sugiere que se tomen en cuenta para futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- AGA. (2010). *Grupo de Análisis y Gestión Ambiental*. Recuperado el 11 de 04 de 2018, de <http://www.etseq.urv.es/aga/Investigacion/LCA.htm>
- Aguilar, A., & Loo, F. (2017). Obtenido de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/9994/AGUILAR_DIEGO_LOO_FELIPE_ANALISIS_DE_ECOEFICIENCIA_DE_LA_DEMOLICION_DE_UNA_EDIFICACION_EN_LIMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- AIA. (2010). *A Guide to Life Cycle Assessment of Buildings*. Obtenido de <https://www.brikbases.org/sites/default/files/aiab082942.pdf>
- AISC. (2018). *Structural steel: an industry overview*. Obtenido de https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/white-papers/structural_steel_industry_overview_2018.pdf
- ALCALA. (2017). *Historia*. Recuperado el 21 de 04 de 2018, de <http://www.alcalacr.org/index.html>
- Bawden, K., & Williams, E. (2015). Hybrid Life Cycle Assessment of Low, Mid and High-Rise Multi-Family Dwellings. *Challenges* 6, 98-116.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 379–388. doi:10.1016/j.rser.2013.05.001
- Cáceres, A. (2016). *Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6682>
- CAPECO. (2019). *Informe económico de la construcción*. Obtenido de https://www.capeco.org/descargas/iec/IEC25_0719.pdf
- Carnegie Mellon University. (2016). *Economic Input-Output Life Cycle Assessment*. Recuperado el 1 de junio de 2019, de Green Design Institute: <http://www.eiolca.net/Method/index.html>
- Centro Mario Molina. (2014). *Análisis de Ciclo de Vida: Edificaciones*. Obtenido de <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2014/01/ACV-edificios-comerciales.pdf>
- Cihat Onar, N., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2014). Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input-output hybrid life cycle

- assessment approach. *Building and Environment* 72, 53-62.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.009>
- Climate Data. (2018). *Clima Helsinki*. Recuperado el 10 de Mayo de 2018, de <https://es.climate-data.org/location/5971/>
- Corporación Aceros Arequipa. (2018). *Reporte de sostenibilidad*. Obtenido de <http://www.acerosarequipa.com/etica-y-gestion-social/reportes-de-sostenibilidad.html>
- Corzo, S. (2016). *Análisis del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7402>
- Ecoinvent. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Obtenido de https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf
- Ecoinvent. (2018). *The Ecoinvent Database*. Recuperado el 20 de Junio de 2018, de <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- El Peruano. (2015). Decreto Supremo que aprueba el Código de construcción sostenible D.S. N° 015-2015-VIVIENDA.
- El Peruano. (2018). Norma Técnica E.030 "Diseño sismorresistente". *Resolución ministerial 355-2018-VIVIENDA*. Obtenido de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf
- Energy Design Resources. (s.f.). *eQUEST*. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <https://energydesignresources.com/resources/software-tools/equest.aspx>
- EPA. (1974). *Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives*. Recuperado el 10 de 04 de 2018, de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100M5VS.PDF?Dockey=9100M5VS.PDF>
- EPA. (1993). *EPA's Life Cycle Methodology: Guidelines for Use in Development of Packaging*. Recuperado el 11 de 04 de 2018, de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100OPHA.PDF?Dockey=P100OPHA.PDF>
- EPA. (2004). *Photochemical smog: what it means for us*. Obtenido de https://www.epa.sa.gov.au/files/8238_info_photosmog.pdf
- 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=P1000L86.PDF>
- EPA. (2012). *Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI)*. Obtenido de <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf>

- EPA. (2016a). *Indicators: Acidification*. Recuperado el 05 de Mayo de 2019, de <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-acidification>
- EPA. (2016b). *Nutrient pollution*. Recuperado el 07 de Mayo de 2019, de <https://www.epa.gov/nutrientpollution>
- EPA. (2017). *El cambio climático y usted*. Recuperado el 01 de Mayo de 2019, de <https://archive.epa.gov/epa/espanol/el-cambio-climatico-y-usted.html>
- EPA. (2018a). *Ozone Layer Protection*. Recuperado el 30 de Abril de 2019, de <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection>
- EPA. (2018b). *Ground-level Ozone Basics*. Recuperado el 03 de Mayo de 2019, de <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#wwh>
- EPA. (2018c). *Conceptos básicos sobre el material particulado*. Recuperado el 06 de Mayo de 2019, de <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#effects>
- EPA. (s.f.). *Renewable Heating And Cooling*. Recuperado el 4 de mayo de 2019, de <https://www.epa.gov/rhc/renewable-space-heating>
- EPA. (s.f.). *What causes acid rain?* Recuperado el 05 de Mayo de 2019, de https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students/whatcauses.html
- Fondo MiVivienda. (2019). *Mivivienda verde*. Obtenido de <https://www.mivivienda.com.pe/portalweb/usuario-busca-viviendas/pagina.aspx?idpage=450>
- Gómez-García , D., Saldaña-Márquez, H., Gómez-Soberón , J., Arredondo-Rea , S., Gómez-Soberón , M., & Corral-Higuera, R. (2019). Environmental Challenges in the Residential Sector: Life Cycle Assessment of Mexican Social Housin. *Energies* 2019, 12, 2837.
- Ganjidoost, A., & Alkass, S. (2012). *Environmental Life Cycle Analysis of Office Buildings in Canadá*. Obtenido de <http://www.ijetch.org/papers/442-P10058.pdf>
- García, S. (2014). *Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5313>
- Guggemos, A., & Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of infrastructure systems* 11, 93-101.

- Huijbregts, M., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendricks, H., Hungerbühler, K., & Jan, H. (2010). Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2189–2196.
- Huijun, J. W., Zengwei, W. Y., Ling, Z., & Bi, J. (2012). Life cycle energy consumption and CO2 emission of an office building in China. *Int J Life Cycle Assess Vol.* 17, 105–118.
- IEA. (2018). *Cement technology roadmap plots path to cutting CO2 emissions 24% by 2050*. Obtenido de <https://www.iea.org/newsroom/news/2018/april/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050.html>
- IEA. (2019). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/statistics/?country=PERU&year=2014&category=Electricity&indicator=ElecGenByFuel&mode=table&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT>
- IEA, & UNEP. (2018). *2018 Global Status Report: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Obtenido de <https://globalabc.org/uploads/media/default/0001/01/f64f6de67d55037cd9984cc29308f3609829797a.pdf>
- IEA; WBCSD. (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Obtenido de <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/4586/61682>
- INACAL. (2018). Obtenido de https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO=6399
- IPP. (2003). *Building on Environmental Life-Cycle Thinking*. Recuperado el 18 de 04 de 2018, de <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2003/EN/1-2003-302-EN-F1-1.Pdf>
- ISO . (1998). *ISO 14041:1998*. Obtenido de <https://www.sis.se/api/document/preview/611594/>
- ISO. (1997). *ISO 14040:1997*. Recuperado el 14 de 04 de 2018, de <https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf>
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006*. Recuperado el 20 de 04 de 2018, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- James J. Hirsch y Asociados. (2004). *Energy Simulation Training for Design & Construction Professionals*. Recuperado el 01 de Junio de 2018, de <http://doe2.com/download/equest/eQuestTrainingWorkbook.pdf>
- Janjua , S., Sarker, P., & Biswas, W. (2019). Impact of Service Life on the Environmental Performance of buildings. *Buildings*, 1-23.

- Junnila, S. (2004). *The Environmental Impact of an Office*. Obtenido de <http://lib.tkk.fi/Diss/2004/isbn9512272857/isbn9512272857.pdf>
- Junnila, S., Horvath, A., & Guggemos, A. (2006). Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States. *Journal of infrastructure systems*, 10-17.
- 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.
- Klöpffer, W., & Curran, M. A. (2014). *LCA Compendium - The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer.
- Kofoworola, O., & Gheewala, S. (2008). Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. *Int J Life Cycle Assess Vol.13*, 498–511 .
- León, J. P. (2017). En Lima se generan 19 mil toneladas de desmonte al día y el 70% va al mar o ríos. *El Comercio*. Recuperado el 03 de Junio de 2019, de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/lima-generan-19-mil-toneladas-desmonte-dia-70-mar-rios-noticia-453274>
- Lessard, Y., Anand, C., Blanchet, P., Frenette, C., & Amor, B. (2018). LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix. *Journal of Industrial Ecology Vol. 22 Num 5*, 1105-1116.
- Ley General del Ambiente. (2005). Obtenido de Ministerio del ambiente: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-ambiente>
- Life Cycle Initiative. (2017). Recuperado el 14 de 04 de 2018, de <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/phase-i/>
- MEF. (2014). *Metodología para la Modificación de la Vida Útil de Edificios, Revaluación de Edificios y Terrenos, Identificación e Incorporación de Edificios y Terrenos en Administración Funcional y Reclasificación de Propiedades de Inversión en las Entidades Gubernamentales*. Obtenido de <https://www.mef.gob.pe/es/normatividad-sp-2134/por-instrumentos/directivas/11328-directiva-n-002-2014-ef-51-01/file>
- Merino, A. L. (2018). *La sostenibilidad de un edificio LEED. Estudio de caso del edificio Leuro, Miraflores*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12877>

- MINAM. (2016). *Preguntas y respuestas Euro IV*. Obtenido de Ministerio del ambiente: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/preguntas-y-respuestas-Euro-IV-15-07-2016Revisi%C3%B3n-Ministro-5pm-copia.pdf>
- MINAM. (s.f.). *Misión y visión*. Recuperado el 24 de 04 de 2018, de Ministerio del ambiente: <http://www.minam.gob.pe/?el-ministerio=mision-y-vision>
- MINEM. (2018). *Balance Nacional de Energía 2016*. Obtenido de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/98790/BNE_2016.pdf
- Molina, M., & Rowland, F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluorocarbons: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249, 810-812.
- 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
- NAMA . (2016). *Cement NAMA in Peru*. Recuperado el 02 de junio de 2019, de NAMA: http://www.nama-database.org/index.php/Cement_NAMA_in_Peru
- NASA. (2018). *NASA*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2018, de <https://climate.nasa.gov/causes/>
- Nygaard Rasmussen, F., Birgisdottir, H., & Birkved, M. (2013). System and scenario choices in the life cycle assessment of a building - changing impacts of the environmental profile. *Proceedings of the Sustainable Buildings - Construction Products and Technologies: Collection of Full Papers* , 994-1003.
- Ochoa, R., Hernández, A., Garfias, M., & Morillón, D. (2017). Life cycle energy and costs of sprawling and compact neighborhoods. *Int J Life Cycle Assess Vol. 22 Issue 4*, 618–627.
- Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrinch, J., & Ding. (2013). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*.
- Pré Consultants. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*. Obtenido de <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>
- 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.

- Ramos, D. (2018). *Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Cusco*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9957>
- Reiter, S. (2010). *Life Cycle Assessment of Buildings – a review*. Obtenido de <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/96541/1/Paper-Reiter-2010.pdf>
- Sarango, D. (2005). Impacto ambiental por uso del gas natural de camisea en la generación de energía eléctrica en el Perú. *Revista de Investigación de Física Vol 8 N°2*, 26-33. Obtenido de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/fisica/article/view/8555>
- Scheuer, C., Keoleian, G., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings* 35, 1049–1064.
- SENAMHI. (2018). Recuperado el 10 de mayo de 2018, de <http://senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle&localidad=0001> .
- 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>
- Sharma, Saxena, Sethi, Shree, & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 15*, 871–875.
- SimaPro. (2018). *LCA software for fact-based sustainability*. Recuperado el 5 de abril de 2018, de <https://simapro.com/>
- Singh, A., Berghorn, G., Joshi, S., & Syal, M. (2011). Review of Life-Cycle Assessment Applications in Building Construction. *Journal of architectural engineering*, 17(1): 15-23.
- Subhi, O. (2016). Life cycle assessment of low-rise office building with different structure–envelope configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering* 43, 193–200 .
- Susuki, & Oka. (1998). Estimation of life cycle energy consumption and CO2 emission of office buildings in Japan. *Energy and Buildings* 28 , 33--41 .
- Thayaprabha, M. (2014). Cost Effectiveness of Post - Tensioned and Reinforced Concrete Flat Slab Systems. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 107-109.
- Tillman, A.-M., Ekvall, T., Baumann , H., & Rydbergl, T. (1994). Choice of system boundaries in life cycle assessment. *J. Cleaner Prod vol 2*, 21-29.

- UNEP. (2003). *Sustainable building and construction: facts and figures*. Obtenido de <http://www.uneptie.org/media/review/vol26no2-3/005-098.pdf>
- USGBC. (2018). Obtenido de <http://www.perugbc.org.pe/site/noticias-y-eventos-259-el-avance-de-proyectos-leed-en-peru>
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2019). 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.
- 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.
- Weidema, B. (2011). Ecoinvent database version 3 – the practical implications of the choice of system model. *LCM 2011 conference*. Berlin.
- Ylmén, P., Peñaloza, D., & Mjörnell, K. (2019). Life Cycle Assessment of an Office Building Based on Site-Specific Data. *Energies* 2019 12, 2588.