

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE IMPACTOS ASOCIADOS A UNA EDIFICACIÓN VERTICAL:
APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

GERARDO GONZALEZ ESPINOZA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. SARA OJEDA BENITEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DRA. SAMANTHA EUGENIA CRUZ SOTELO

MEXICALI, B.C.,

ENERO 2025

Contenido

1.	Generalidades	7
1.1	Planteamiento del problema	7
1.2	Justificación	8
1.3	Objetivos	9
1.3.1	Objetivo principal	9
1.4	Hipótesis	10
1.5	Generalidades	10
1.5.1	Desarrollo sustentable en la edificación	12
1.5.2	Análisis de ciclo de vida de materiales de construcción	12
1.5.3	Economía circular en la construcción de edificios	15
1.5.4	ACV de edificios	17
1.6	Medio ambiente y Desarrollo sustentable	17
1.7	Manejo sustentable de residuos sólidos	19
2.	Marco teórico	21
2.1	Marco conceptual	21
2.1.1	Sustentabilidad	21
2.1.2	Desarrollo sustentable	21
2.1.3	Ciclo de vida	22
2.1.4	Residuos	23
2.1.5	Residuos de manejo especial	24
2.1.6	Residuos de construcción y demolición	24
2.2	Clasificación de los residuos	26
2.3	Plan de manejo de RCD	28
2.3.1	Estrategias y metas del plan nacional de manejo de RCD	30
2.4	Jerarquía de residuos	31
2.5	Generación de RCD por etapas	31
2.5.1	Estimación de RC	32
2.5.2	Estimación de RD	32
2.6	Marco normativo	33
2.7	Legislación internaciones de residuos de construcción	33

2.8	Legislación nacional ambiental de residuos sólidos de manejo especial	33
2.9	Legislación estatal y municipal de residuos sólidos de manejo especial	34
3.	Metodología	36
3.1	Análisis de ciclo de vida del edificio	43
3.1.1	Definición de objetivo y alcance	45
3.1.2	Inventario de ciclo de vida	45
3.1.3	Evaluación de ciclo de vida	46
3.2	Análisis del caso de estudio.	46
3.2.1	Descripción del edificio	46
3.3	Aplicación del ACV mediante EI4B	47
3.4	Resultados del ACV usando EI4B	48
3.4.1	Análisis de ciclo de vida por etapas escenario base	49
4.	Resultados y discusión	53
4.1	Análisis del escenario base	53
4.2	Evaluación del Escenario 1	60
4.3	Evaluación del escenario 2	66
4.4	Evaluación del escenario 3.	69
4.4.1	Consumo de energía	73
4.4.2	Residuos sólidos de construcción y demolición	73
4.5	Análisis de ciclo de vida dimensión social	74
4.5.1	Inventario de ACVS	75
4.6	Análisis de ciclo de vida dimensión económica	78
4.6.1	Inventario de ciclo de vida (ICCV) para la mano de obra, Materiales y herramienta	79
4.7	ACV Dimensión ambiental con Simapro.	81
5.	Conclusiones y recomendaciones	83
6.	Referencias	86
7.	Anexo	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología del ACV.....	13
Figura 1.2 Límites del sistema del ciclo de vida del concreto.....	14
Figura 1.3 Diagrama de las fases de la economía circular.....	16
Figura 2.1 Modalidades de los planes de manejo de los residuos de manejo especial	25
Figura 2.2 Clasificación de residuos de acuerdo a la normatividad.....	26
Figura 2.3 Fuentes potenciales de generación de RSD y su disposición.....	28
Figura 2.4 Estrategias del plan de manejo de la cámara mexicana de la industria de la construcción	30
Figura 2.5 Jerarquía de residuos.....	31
Figura 3.1 Diagrama general de metodología	38
Figura 3.2 Etapas de ciclo de vida propuestas por la norma UNE EN 15879	39
Figura 3.3 Planta arquitectónica y edificio construido.....	46
Figura 3.4 Diagrama de la metodología que implementa EI4B	48
Figura 4.1 Porcentajes de emisiones potenciales ambientales de la construcción: escenario base	53
Figura 4.2 Potencial de calentamiento global en Kg CO ₂ eq en escenario base.....	54
Figura 4.3 Consumo de energía en MJ en escenario base	54
Figura 4.4 Consumo de energía fósil por etapa de construcción, escenario base	55
Figura 4.5 Emisiones de potencial de calentamiento global por sistema constructivo	55
Figura 4.6 Potencial de destrucción de la capa de ozono e kg CFC-11 eq. Escenario base	56
Figura 4.7 Total de emisiones por elemento constructivo del escenario base	56
Figura 4.8 Consumo de tipos de energías por etapas de ciclo de vida	57
Figura 4.9 Aplicación del ACV por escenarios planteados	59
Figura 4.10 Emisiones potenciales en los diferentes periodos del ciclo de vida	63
Figura 4.11 Emisiones potenciales a los 85 años.....	64
Figura 4.12 Emisiones potenciales a los 100 años.....	65
Figura 4.13 Emisiones potenciales a los 150 años.....	66
Figura 4.14 Evaluación del consumo de energía en el escenario 2	67
Figura 4.15 Emisiones de potencial de calentamiento global CO ₂ eq	68
Figura 4.16 Potencial de smog Kg O ₃ eq.....	68
Figura 4.17 Sistemas constructivos propuestos	70
Figura 4.18 Emisiones potenciales por sistema constructivo	71
Figura 4.19 Emisiones potenciales por sistema constructivo por etapas del ciclo de vida	72
Figura 4.20 Categorías de impacto social	74
Figura 4.21 Procesos analizados en el inventario de ciclo de vida dimensión social	75
Figura 4.22 inventario de ciclo de vida de empleos por procesos	76
Figura 4.23 Categorías de impacto social observadas.....	77
Figura 4.24 Costo de ciclo de vida: Dimensión económica	78
Figura 4.25 Costos de ciclo de vida del edificio vertical	80
Figura 4.26 Economía circular aplicada a la industria de la construcción	81

Índice de tablas

Tabla 2.1 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso.....	27
Tabla 2.2 Identificación de usos propuestos de los RCD	29
Tabla 3.1 Materiales introducidos en Athena	41
Tabla 3.2 Categorías de evaluación de impacto.....	42
Tabla 3.3 Definición de los materiales a analizar	43
Tabla 3.4 Etapas de construcción	43
Tabla 3.5 Etapas de generación de residuos de construcción y demolición a analizar	44
Tabla 3.6 Lista de materiales que componen la unidad funcional descrita.....	47
Tabla 3.7 Impactos ambientales por etapa analizada del ACV del edificio	51
Tabla 3.8 Impactos ambientales por elementos en la etapa de construcción	52
Tabla 4.1 Factores de medición de la edad de un edificio.....	61
Tabla 4.2 ICCV de mano de obra por etapa de construcción	79

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Estimación de los RC.....	32
Ecuación 2: Cálculo de la vida útil estimada de un edificio	61

RESUMEN

Es indispensable hacer una mayor conciencia del problema medioambiental que nos toca vivir, un ejemplo de ello es el derretimiento de los polos causado por el calentamiento global. Es indudable la necesidad de cambiar hábitos, malas costumbres y sobre todo pensar en el futuro de las nuevas generaciones.

Con relación a lo anterior la demanda de vivienda es una necesidad social básica para los seres humanos y se ha incrementado de manera acelerada por el crecimiento natural de la población. Al tratar de satisfacer esta necesidad en el México se construyen una gran cantidad de viviendas, que en las grandes ciudades o en ciudades en desarrollo la construcción de edificios residenciales ha incrementado por la accesibilidad a los servicios y la cercanía a los nodos importantes de la ciudad, como es el caso de los desarrollos verticales en la ciudad de Mazatlán. Este tipo de construcción genera al año altas cantidades de residuos de construcción y demolición que son depositados en sitios no controlados ocupando áreas extensas ocasionando problemas medioambientales.

Los materiales de construcción como el concreto, cerámicas, plásticos y aceros son materiales procesados de la materia prima y requieren grandes cantidades de energía para su elaboración y distribución estos materiales son necesarios en la construcción y al menos el 3% de estos se convierten en residuos.

Realizar inventarios de los residuos de construcción y demolición (RCD) y medir los impactos ambientales que generan darán la pauta para seleccionar materiales sustentables que favorezcan al desarrollo sustentable esto como acción para desacelerar los problemas ambientales que nos enfrentamos actualmente como sociedad.

Así mismo, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha convertido en una herramienta útil para medir los impactos generados en la producción de los materiales de construcción y demolición. Así mismo mediante el ACV se analizó un edificio en etapa de construcción y se diseñaron diferentes escenarios alternativos para evaluar la edificación vertical, alargando el tiempo de vida útil, simulando diferentes tipos de envolventes y el uso de las energías renovables, para obtener indicadores de sustentabilidad.

1. Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

La industria de la construcción es uno de los sectores más importantes y estratégicos para el desarrollo, sin embargo, como cualquier actividad económica que emplea insumos, los transforma y procesa, también ocasiona impactos al ambiente por el consumo de materia y genera residuos como escombros, concretos, madera, entre otros materiales. En este sentido, Silgado y cols (2018) señalan que el sector de la construcción es responsable del 40% de la energía consumida, del 50% de los recursos naturales empleados y del 50% de los residuos generados a nivel mundial.

Los residuos generados por la industria de la construcción son conocidos como residuos de construcción y demolición (RCD) son una mezcla de diferentes corrientes de desechos, incluidos los desechos inertes, residuos no peligrosos y residuos peligrosos, generados a partir de la construcción, renovación y demolición (European Commission, 2008). De acuerdo a Mercante (2007) los RCD son el material de residuos que se produce en procesos de construcción, renovación o ampliación de estructuras. Los componentes típicos incluyen; concreto, asfalto, madera, metales, yeso, cerámicos, tejas, ladrillos, vidrios. La problemática fundamental de gestión y disposición de éstos está asociada al volumen que se genera, así como a los costos de transporte y al espacio necesario disponible que implica. Otro problema asociado lo representa la generación de residuos peligrosos que deben gestionarse adecuadamente para prevenir daños ambientales. La gestión de los RCD y su generación varían según la región y dependen de otros factores que influyen en su generación, tales como: población actividad de construcción, materiales tradicionales de construcción y sistemas constructivos.

Aldana y Serpell (2016), señalan que la industria de la construcción genera la mayor cantidad de residuos sólidos en el mundo y se está convirtiendo en un problema ambiental y social para las futuras generaciones. Por ello la generación de RCD cobra importancia debido a que en muchas ocasiones sobrepasan la capacidad de manejo y de disposición controlado o autorizado, es por ello la importancia de establecer una estrategia de manejo de los residuos pues estos volúmenes generan un importante impacto al medio ambiente, social y económico (Esa, 2017).

En la mayoría de los países el relleno sanitario es el principal método para deshacerse de los residuos. Los rellenos controlados tienen un impacto importante tanto ambiental, como económico. En consecuencia, el primer paso para mejorar esta situación consiste en generar menos residuos y hacer de estos la aplicación de las 3R (Reducir, Reciclar, Reutilizar). Así mismo es evidente la necesidad de usar materiales de construcción de bajo impacto ambiental con la finalidad de minimizar la carga ambiental por los procesos extracción de material prima y elaboración o

fabricación de materiales de construcción, pues lo que se requiere es disminuir la cantidad de residuos sólidos de construcción en sitios de disposición y de relleno que contaminan los ecosistemas existentes.

El mercado inmobiliario y el desarrollo habitacional vertical en Mazatlán se ha mantenido en crecimiento en un 20% en los últimos cinco años, declarando una relación de 35,000 nuevos lotes en las áreas urbanas, y tan solo en la franja turística se han presentado 40 desarrollos verticales, En los últimos dos años la inversión captada en la ciudad de Mazatlán fue de 29,476 millones de pesos en inversión privada destinada a la industria de la construcción impulsando al sector turístico y de parques residenciales.

Es por ello que se requiere tomar medidas medioambientales en la fabricación y distribución de materiales de construcción generados en la localidad que el auge inmobiliario demanda, así como generar planes de manejo para los residuos de construcción generados en los procesos de construcción y demolición.

1.2 Justificación

Con la crisis ambiental surgieron algunos criterios de cómo mitigar el daño generado en el medio ambiente (Gallini, 2002) entre ellos el realizar construcciones sustentables. Por lo que, en este sentido, el construir conlleva considerar las pautas necesarias para la disminución del impacto ambiental.

Para lograr el desarrollo sustentable es importante considerar la evolución de las áreas urbanas y regionales aun cuando una región no sea altamente urbanizada, en las próximas décadas el crecimiento de la población urbana será aún más relevante que en la actualidad, llegando a alcanzar entre el 66 % y 85 % de la población mundial para el año 2050 (Nogués et al., 2019)

El plan municipal para el desarrollo de Mazatlán establece tres ejes primordiales para el desarrollo de la ciudad 1) bienestar para el pueblo, 2) prosperidad y crecimiento económico, 3) servicios públicos y desarrollo urbano sustentable, estos dos últimos relacionados a la inversión pública y privada y al desarrollo de infraestructura y mercado hotelero e inmobiliario departamental, donde en su línea de acción estratégica del programa de desarrollo urbano y medio ambiente tiene como metas las siguientes consideraciones.

- Actualizar el reglamento ambiental municipal de residuos sólidos urbanos.
- Cumplir al 100 % con las normas aplicables a la disposición de residuos sólidos de la ciudad de Mazatlán.

- Elaborar el proyecto de nuevo sitio de disposición final y tratamiento de residuos sólidos y de manejo especial de la ciudad de Mazatlán bajo el cumplimiento de la norma-083-semarnat-2003.
- Clausurar el sitio actual de disposición final de residuos sólidos urbanos.

Por otra parte, (Orea, 2013) menciona que el impacto ambiental va más allá de las consideraciones vinculadas con enfoques estratégicos de planificación ambiental-territorial ya que en esto, también destaca la construcción de vivienda que ocupa grandes extensiones en las ciudades. Ante el crecimiento poblacional, la demanda de vivienda y las necesidades del cuidado del medio ambiente natural, se ha propuesto en general construir con materiales de construcción de bajo impacto ambiental a fin de contribuir a la mejora continua de los recursos y el medio ambiente y ahorros de energía.

Lo anterior en suma hace evidente la necesidad de buscar mejorar los procesos de la industria de fabricación de materiales, así como de la construcción con el uso y disposición de materiales y los sistemas constructivos que disminuyan los impactos medioambientales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

- Aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para elaborar una propuesta de uso de materiales sustentables para la industria de la construcción en un desarrollo urbano vertical en Mazatlán, Sinaloa.

1.3.1.1 Objetivos específicos

- Analizar los materiales de construcción predominantemente utilizados en la zona de estudio con base a la metodología de ciclo de vida a nivel de impacto ambiental que generan.
- Elaborar un inventario de materiales y procesos asociados a la construcción de desarrollos urbanos verticales.
- Diseñar escenarios para la edificación de desarrollos urbanos sustentables.
- Evaluar escenarios para identificar procesos y/o materiales de mayor costo ambiental, económico y social.
- Establecer indicadores económicos, sociales y ambientales de mejora en la edificación sustentable.

- Establecer criterios sustentables de gestión de residuos de construcción y de demolición hacia una economía circular.

1.4 Hipótesis

Los materiales de construcción convencionales utilizados en la edificación de desarrollos urbanos en la ciudad de Mazatlán generan altos impactos ambientales asociados a los consumos de energía y recursos naturales.

Preguntas de investigación

Pregunta principal:

1. ¿Cuál es el sistema constructivo que aporta beneficios en disminuir los impactos ambientales que provoca el desarrollo urbano habitacional en Mazatlán Sin?

Preguntas Secundarias:

¿Cuáles son los impactos ambientales asociados a la construcción de una edificación vertical?

¿Cuáles son las políticas ambientales aplicables a un sistema constructivo habitacional en Mazatlán Sin?

¿Cuál es la etapa de ciclo de vida de un desarrollo urbano habitacional con mayores impactos ambientales en Mazatlán Sin?

¿Cuáles son los lineamientos de gestión ambiental para la construcción de un desarrollo urbano habitacional sustentable?

¿Cuál es la aceptación social de un desarrollo habitacional sustentable?

1.5 Generalidades

En esta sección se desarrollaron temas referentes al estudio de los materiales de construcción y sus impactos medio ambientales abordando los diferentes puntos de vista de análisis de ciclo de vida, residuos de construcción y demolición y gestión de residuos sólidos

El acelerado crecimiento poblacional ha despertado la sensibilidad y preocupación a nivel mundial referente a los impactos ambientales generados por los residuos sólidos de construcción, así como el exceso de consumo de energía para la elaboración de materiales de construcción. Considerables esfuerzos han sido base para la exploración de los residuos de construcción y demolición (RCD) como uso de materiales reciclados (MR), un estimado de generación de residuos anual en el mundo actualmente supera las 17 mil toneladas y para el año 2050 se espera que sean 27 mil toneladas anuales (Laurent, y cols. 2014). Este tema es de vital importancia pues si no se atiende puede causar grandes daños a la salud humana, a los ecosistemas y al medio ambiente natural.

Los esfuerzos en la investigación han generado resultados positivos con el estudio de los materiales de desecho por ejemplo (Huang, Bird, & Heidrich, 2007) estudiaron los materiales como la escoria de acero, vidrio de desecho, neumáticos, plásticos etc., para el desarrollo de pavimentos asfálticos, por su parte (Meng, Ling, & Mo, 2018) en su estudio trabajaron sobre el reciclaje de una gama de materiales de desechos sólidos en la producción de bloques de concreto, incluidos ladrillos triturados, vidrio de desecho, concreto reciclado, desechos de cerámica y desechos de baldosas. Así también (Luhars., Cheng, & Luhar, 2019b) describen los materiales geopolímeros como sustitutos parciales o materiales complementarios ampliamente recomendados en el uso del cemento portland.

El concreto es el material más usado en la industria de la construcción por su bajo costo, la disponibilidad de materia prima, sus propiedades y capacidades mecánicas en relación a lo anterior se estima que un tercio de los residuos sólidos de construcción se compone del concreto y sus derivados, los residuos de concreto son transportados en camiones de carga a los rellenos sanitarios para la eliminación, sin embargo en esta disposición las leyes ambientales hacen atractiva la opción del reciclaje por sus beneficios, así este proceso ha recibido una gran atención (Xuan, Tang & Poon, 2019). Los tabiques de arcilla son el segundo material más utilizado en la industria de la construcción, después del concreto. Su origen no sólo proviene de las actividades de demolición, sino también de los tabiques rechazados durante los procesos de fabricación, transporte y construcción. Estos tabiques se producen a partir de una mezcla de suelo de arcilla con agua y otros agregados.

También se han estudiado los tabiques de arcilla triturados como agregado grueso o finos en los productos, este producto en comparación con el tabique original se muestra más débil y poroso, sus propiedades mecánicas son modificadas sin embargo se encontró que sus propiedades térmicas y de aislamiento fueron positivas, también se reportó que el tabique triturado sirve como un material permeable si es mezclado con concreto (Sata, Wongsu & Chindaprasit, 2013 y Wei, et al. 2024)

Así mismo se han realizado estudios con los materiales cerámicos de desecho que se utilizaron en la construcción, como recubrimientos de pisos, suelos, pared y sanitarios, la producción de este material no es muy diferente a la producción del tabique de arcilla, iniciando por la extracción de materias primas, mezcla, moldeo, quemado, pulido y acristalamiento, la diferencia es que la cerámica es elaborada con alto nivel de calor para cristalizar el componente de sílice y formar el material vitro, que posea mejores propiedades de densidad, dureza, resistencia, resistencia a los productos químicos y a las bajas temperaturas sin dilatarse o contraerse (Tang, et al. 2007).

1.5.1 Desarrollo sustentable en la edificación

Los edificios son responsables de un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) (Nußholz et al., 2019a). El nivel crítico y máximo de calentamiento global es de +2°C en comparación a las temperaturas preindustriales esto indica que se requieren medidas sustanciales, como minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas (Edenhofer et al., 2014).

Las emisiones de carbono durante el ciclo de vida de un edificio y las contribuciones resultantes al calentamiento global se pueden dividir entre impactos operativos y corporales. Los impactos operativos están directamente implicados con la energía requerida para operar el edificio en la fase de uso (por ejemplo, calefacción y refrigeración), los impactos incorporados son el resultado de procesos en el ciclo de vida de los materiales de construcción (por ejemplo, producción, rehabilitación y final de la vida útil) (Shadram & Mukkavaara, 2018).

La necesidad de reducir las emisiones asociadas con los edificios tiene inferencia entre los representantes políticos a nivel global, así como entre las empresas (Edenhofer et al., 2014), utilizando un modelo de negocio circular. Al final de la vida útil de un edificio, las prácticas de demolición selectiva y la segregación de residuos en la fuente de origen han resultado fundamentales para proporcionar fracciones y colectar RCD. En este sentido en Suecia se ha desarrollado un esquema de certificación Miljöbyggnad para mejorar la sustentabilidad de los materiales de los edificios (Nußholz et al., 2019b) También existen otros esquemas de certificación de edificios; entre ellas BREEAM, DGNB, HQE, LEED, estas toman en cuenta el uso de materiales y la gestión adecuado de los RCD. Por lo que la realización de auditorías previas a la demolición puede ayudar a lograr este objetivo, al proporcionar un inventario completo de materiales en el edificio que se va a demoler (Akanbi et al., 2018).

1.5.2 Análisis de ciclo de vida de materiales de construcción

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se introdujo a principios de la década de 1960, es una metodología estandarizada internacionalmente que evalúa cualitativa y cuantitativamente la carga ambiental y recursos utilizados a lo largo de un ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima hasta la producción, uso, mantenimiento, reciclaje y eliminación, así como también evalúa estrategias para optimizar el uso de recursos, flujos de agua y energía en el sistema analizado (Mah et al., 2018).

La implementación del ACV se realiza en cuatro etapas: 1) Definición de objetivo y alcance; 2) Análisis de inventario de ciclo de vida 3) Evaluación de impacto del ciclo de vida y 4)

Interpretación de resultados (ISO, 2006). El ACV normalmente excluye la evaluación de los aspectos económicos y el análisis de impacto económico proporciona una visión integral de los costos asociados con cada etapa del ciclo de vida de un producto o servicio (figura 1.1). El análisis económico corresponde al costo del ciclo de vida (CCV). Otro método económico común es el costo del ciclo de vida ambiental (CCVA), que es la evaluación de costos que utiliza los límites del sistema idénticos con ACV. El CCVA es un complemento del ACV y se utiliza en este estudio para determinar el indicador económico de escenarios de gestión de residuos.

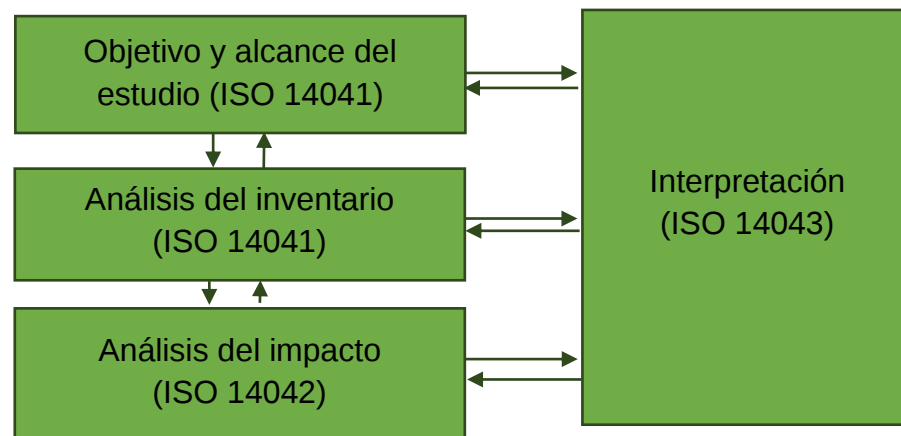


Figura 1.1 Metodología del ACV.

En general los residuos procedentes de las actividades de construcción y demolición pueden tener diferentes fuentes según el proceso en el que se generen, por ejemplo, residuos de construcción (RC), residuos de demolición (RD) o en conjunto residuos de construcción y demolición (RCD) y también se pueden clasificar dependiendo de la actividad de origen si son de edificaciones o de obra civil (Bovea & Powell, 2016).

Una alternativa para disminuir los impactos ambientales asociados a los RCD es utilizando materiales cementantes suplementarios (MCS) como son las cenizas volantes y humo de sílice y agregados reciclados como los agregados de concreto reciclado.

Un estudio realizado en la Unión Europea (UE) por (Kurda et al., 2018) definen la unidad funcional como el m³ de concreto con diferentes proporciones de cenizas volantes (CV) al (0%,30% y 60%), agregado de concreto reciclado fino (ARF) al (0%.50% y 100%) y agregado de concreto reciclado grueso (ARG) al (0% y 100%) y al 1% de súper plastificante (SP). Así mismo define el objetivo de estudio de la “cuna a la puerta” que se refiere al escenario A1 es la extracción/producción de las materias primas necesarias para producir las mezclas de concreto, A2 es el impacto del transporte de las materias primas a la planta de concreto y A3 es el proceso de producción de concreto en planta.

Considera a estas mezclas la resistencia a la compresión donde estima que el añadir el Agregado Reciclado Grueso (ARG) al concreto fresco es perjudicial y que el Agregado Reciclado Fino (ARF) tiene mayor adición esto a edades tempranas, pues después de los 28 días la resistencia a la compresión aumenta con la integración de AGR. (Kurad et al., 2017).

Por otro lado, explica los resultados de la evaluación de impacto del ciclo de vida de las mezclas de concreto para los diferentes escenarios A1-A3 para obtener el impacto ambiental de la producción de 1m³ de concreto de acuerdo a la composición de la mezcla. En la figura 1.2, se refleja el límite del sistema analizado.

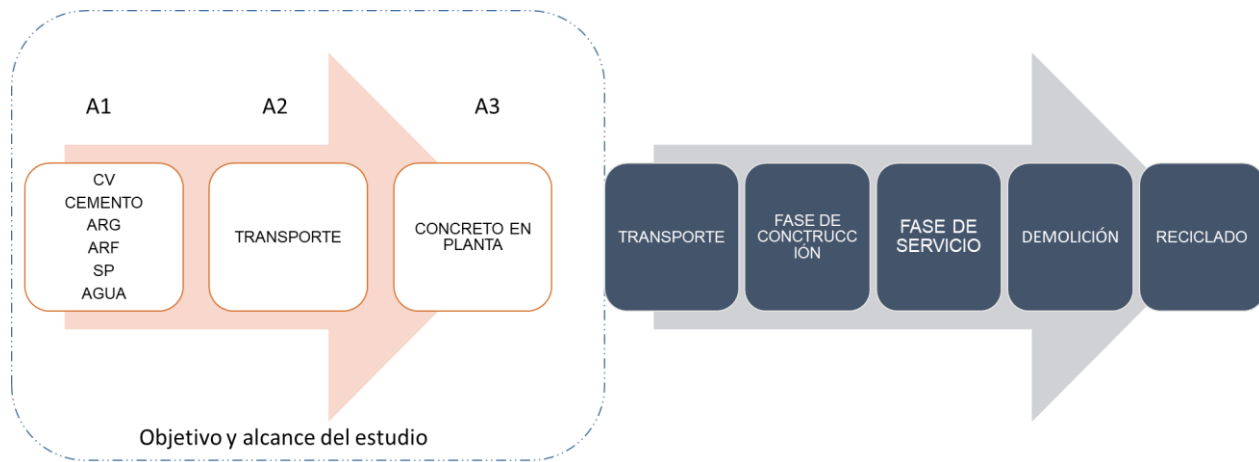


Figura 1.2 Límites del sistema del ciclo de vida del concreto

Para la obtención de los resultados en el que los datos que no fueron confiables se utilizó la base de datos de la herramienta SimaPro, así mismo analiza las categorías de impactos de: Potencial de calentamiento global (PCG) también conocido como efecto invernadero que evalúa el calor atrapado en la atmósfera. El potencial de agotamiento abiótico (PAB) que es un método para evaluar la extracción de recursos primarios no renovables. El potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF), está relacionado con la generación de oxidantes en la atmósfera, los oxidantes tienen un impacto negativo en los ecosistemas y en la salud humana ya que son altamente tóxicos. Potencial de acidificación (PA) y potencial de eutrofización (PE) los principales gases responsables de la acidificación son el azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el nitrógeno reducido (NH_x) estos son generados principalmente de la ignición de combustibles fósiles. Por otra parte, la eutrofización consiste en el enriquecimiento de una zona determinada con nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo de emisiones contaminantes, aguas residuales y fertilizantes. (Regulatory & Authority, 2007)

En términos generales la (EI) aumentó ligeramente cuando se utilizó Superplastificante (SP) hasta un 4%. Además, el índice de incorporación de ARF no cambió los resultados para la mayoría de las categorías de la EI.

La categoría de impacto se ve afectada principalmente por el contenido de cemento, disminuye significativamente con la tasa de incorporación de CV, de hecho, el cemento es el mayor contribuyente a los GEI que desde un 87% a un 96%.

En cuanto a la categoría de creación de ozono fotoquímico disminuyó significativamente (16%) cuando se incorporó CV en la mezcla de concreto. Y se ve menos afectada utilizando ARF en comparación con la mezcla de ARG.

1.5.3 Economía circular en la construcción de edificios

La economía circular y la sustentabilidad han tomado popularidad en los campos políticos, académicos y de la iniciativa privada donde se han realizados esfuerzos para establecer la relación conceptual entre economía circular y sustentabilidad, la primera se define como “un sistema regenerativo en el que la entrada de recursos y residuos, emisiones y energías, las fugas se minimizan al reducir la velocidad, el cierre y el estrechamiento de los bucles de la materia y energía” (Geissdoerfer et al., 2017), mientras que la sustentabilidad se define como “un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”(Brundtland, 1987).

La economía circular asegura que el valor añadido de los productos se mantenga dentro del círculo económico durante el mayor tiempo posible para evitar la generación de residuos a los rellenos sanitarios la figura 1.3 muestra las fases de un modelo de economía circular, cada una de las cuales presenta oportunidades en términos de reducción de costos y dependencia de los recursos naturales como única fuente de insumo material para la construcción y otros procesos de producción (Pan et al., 2015).

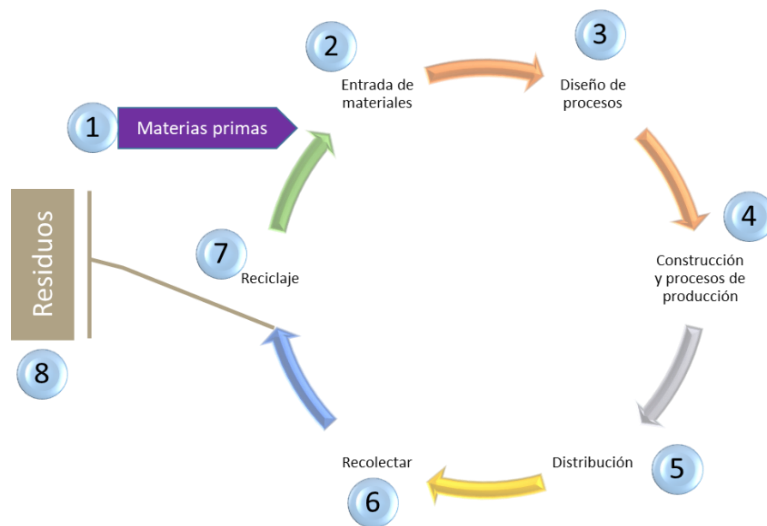


Figura 1.3 Diagrama de las fases de la economía circular

El principal objetivo de la economía circular es maximizar el uso de materiales mediante la recolección y reutilización (etapa 6) y el reciclaje (etapa 7). Esto es para reducir la cantidad de desechos (etapa 0) que se generan, lo que lleva a una solución en la que todos se benefician (Pan et al., 2015).

Los beneficios más importantes de la economía circular, son los económicos, sociales y ambientales, en el ámbito económico contribuye al alto nivel de competitividad regional, nacional e internacional a través de un aumento en la eficacia de la asignación, la utilización y la productividad de recursos, esto direcciona a una economía estable como resultado de la seguridad de recursos. En cuanto a los beneficios ambientales reduce los impactos negativos sobre el medio ambiente con el rediseño de la estructura industrial de forma ecológica y socialmente facilita la creación de fuentes de empleo adicionales, la distribución equitativa del crecimiento económico y la mejora del bienestar de las personas (WRAP & Green Alliance, 2015).

La industria de la construcción tiene impactos importantes en los aspectos sociales, ambientales y económicos (Gencel et al., 2012). Sus actividades han contribuido al Producto Interno Bruto (PIB), así como a la generación de oportunidades de empleo y otras facilidades para satisfacer las necesidades de la sociedad. Sin embargo, con la gran cantidad de material que se consume en la industria de la construcción, también se genera una gran proporción de desechos de construcción y demolición anualmente en el mundo. Esta generación de residuos tiene su efecto contaminante sobre el medio ambiente en forma de agotamiento de rellenos sanitarios, emisiones de carbono y gases de efecto invernadero, enormes desperdicio de energía incorporada y materias primas y aumento de los costos del proyecto (Akanbi et al., 2018).

Para garantizar una economía circular eficaz, es importante que un buen porcentaje de los materiales de construcción sean recuperables para su reutilización y reciclaje (Hossain, et al. 2020 y Norouzi, et al. 2021). Esto asegura que se minimice el uso de materias primas y la eliminación de residuos en rellenos sanitarios. Aunque el reciclaje de materiales de construcción es una práctica común, la reutilización es un uso de materiales más orientado al valor. Esto se debe a que el reciclaje requiere más uso de energía que la reutilización de materiales.

1.5.4 ACV de edificios

El ACV surgió como una medida regulatoria y se ha estudiado durante las últimas dos décadas, esto debido en gran medida a la importancia del cuidado al planeta, la organización internacional de normalización (ISO) formalizó la metodología del ACV para examinar el rendimiento de los sistemas industriales, desde el punto de extracción de las materias primas, pasando por el proceso de fabricación y finalmente hasta la eliminación del producto (ISO, 2006).

Sin embargo en mayo 2012 aparece la normativa sobre ACV EN 15978 específicamente para edificación, donde establece un marco desde la extracción de materia prima, fabricación de materiales, transporte, edificación o ensamblaje, transporte, energía consumida durante la etapa de uso, el agua consumida, las modificaciones realizadas durante el ciclo de vida del edificio, el inventario de recursos consumidos al final de la vida útil y la etapa de cargas evitadas por los procesos de tratamiento de residuos como la reutilización, reciclaje y disposición final de los materiales utilizados en las cada una de las etapas(UNE-EN15978:2012, 2012).

Tradicionalmente las emisiones incorporadas en los materiales de construcción no se han considerado en los ACV, sin embargo, se están volviendo cruciales debido al corto periodo de tiempo en el que se reducen las emisiones, además la carga medioambiental de los materiales de construcción se ha demostrado que es problemático y la confianza de las estimaciones de impacto reportadas es discutible, es por ello urgente en el sector de la construcción contar con bases de datos robustas para respaldar y orientar la toma de decisiones.

1.6 Medio ambiente y Desarrollo sustentable

En recuento a la conferencia mundial de las naciones unidas sobre el medio ambiente realizada en Estocolmo Suecia en el año 1972, por primera vez se revelaron preocupaciones en relación a los problemas ecológicos y de desarrollo, años posteriores en 1976 en Vancouver, Canadá en la conferencia de hábitat se consideró la necesidad de mejorar la calidad de vida atrás de provisión de vivienda adecuada para la población y el desarrollo sustentable de los asentamientos urbanos.

Así mismo la comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo adoptó el documento *Nuestro futuro común o informe Bruntland*, que constituye el acuerdo más amplio entre científicos y políticos del planeta y que sintetiza los desafíos globales en materia ambiental en el concepto de desarrollo sustentable. Este se definió como: aquel que satisface las necesidades esenciales de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras.

En este contexto se define una relación entre desarrollo ecológico considerando un equilibrio entre Aire, Suelo y Agua, así mismo la sustentabilidad económica es decir equidad entre la población, distribución de las riquezas, desarrollo económico, producción y consumo y gobierno. Y bien preservar paralelamente la equidad entre la presente generación y las generaciones futuras en salud, educación, vivienda, seguridad y protección de derechos.

Esta primera conceptualización representó la primera visión del mundo que incluye los aspectos ambientales dentro del desarrollo económico y social, permitiendo el surgimiento del concepto de “sustentabilidad”, que más tarde abriría la puerta para diferentes investigaciones y acuerdos internacionales (REDCLIFT, 2005), siendo uno de ellos, la Segunda Cumbre de la Tierra realizada en el año de 1992 en Río de Janeiro. Más adelante, en el año de 1997 se llevó a cabo el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático, cuyo propósito se enfocó en la reducción de un 5% de las emisiones totales de seis gases de efecto invernadero. Su entrada en vigor fue hasta el año 2005 con la ratificación de 154 países, excepto Estados Unidos que, en el año 2001, encabezado por el presidente George W. Bush, rechazó los lineamientos del protocolo por ir en contra de sus propios intereses (NACIONES UNIDAS, 1998).

En el marco normativo nacional México toma acciones para el cumplimiento de las metas del desarrollo sustentable a nivel internacional creando en 1988 la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente donde se describe en el artículo 3° el desarrollo sustentable como el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección al ambiente y aprovechamiento de los recursos naturales, de manera que no comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

Por otra parte, en diciembre del año 1994 se creó la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), cuya función principal era el diseño de la política ambiental bajo los criterios del desarrollo sustentable. Así pues, México cuenta por primera vez con una Secretaría de Estado que une los distintos aspectos ambientales, tales como áreas naturales protegidas, calidad del aire, política en materia de desechos peligrosos, vida silvestre, ordenamiento ecológico

e impacto ambiental, cambio climático, regulación ambiental, pesca, bosques, agua, suelos y educación ambiental. Con el cambio de la ley de la administración pública federal en el año 2000 se origina la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) que se encuentra vigente en la actualidad.

Con relación a lo anterior (Vargel, 2018) menciona, que, en materia ambiental en México, uno de los principales desafíos que ha enfrentado la sustentabilidad ha sido la reducción de la emisión de gases efecto invernadero (GEI), dado que estos constituyen la principal causa del fenómeno conocido como calentamiento global. Los principales GEI son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). En el contexto nacional, la ciudad de México fue el primer país en establecer una ley relacionada con la emisión de GEI, sin embargo, al día de hoy no se llevan a cabo mediciones de GEI emitidos por fuentes fijas y de área, además, no se cuenta con factores de emisión nacionales, por lo tanto, se utilizan los valores por defecto del IPCC. Aunque se han logrado avances relevantes, cada categoría de emisión cuenta con serios vacíos y necesidades en materia de información e investigación.

En el año 2002 tuvo lugar la Cumbre de Johannesburgo centrada en el desarrollo sustentable que manejó temas clave como pobreza, derechos humanos, gestión de recursos naturales y globalización. Veinte años después de la Cumbre de Río, se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible denominada “Río +20”, que reunió a diferentes líderes mundiales, representantes del sector privado y a organizaciones no gubernamentales para deliberar sobre las medidas que se deben tomar en torno a la sustentabilidad (NACIONES UNIDAS, 2016). Si bien, la convocatoria Río +20 reavivó las esperanzas de avanzar en la transición a una sociedad global sustentable, las barreras todavía dominan la agenda pública de muchos países, que, en algunos casos, parecen ignorar la problemática (GUIMARAES, 2016).

A mediados del 2015 fue presentado el informe “Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de las Naciones Unidas”, documento que presenta la evaluación del avance y los logros de cada país y del mundo, con respecto a los Objetivos del Milenio propuestos en el año 2000. Si bien, se lograron avances en determinados aspectos, aún queda un gran trabajo por hacer en áreas como pobreza, concentración de la riqueza, contaminación, pérdida de la biodiversidad y calentamiento global. (NACIONES UNIDAS, 2015).

1.7 Manejo sustentable de residuos sólidos

Un aspecto cada vez más importante relacionado con el desarrollo sustentable se refiere al impacto generado de la gestión de RSU que contribuye a la emisión antropogénica de metano un gas potente de los GEI con un efecto de calentamiento global de 25 veces mayor que el dióxido

de carbono, debido a la descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de residuos en rellenos sanitarios (Aleluia & Ferrão, 2016).

La aplicación de la evaluación del ciclo de vida se estima que integrada con las prácticas de gestión sustentable de los residuos basada en los principios de reducción, reutilización y reciclaje (3R) puede reducir las emisiones totales de GEI en aproximadamente un 20% (Wilson, 2010).

El manejo de los residuos debe ser parte de una política integral de desarrollo sustentable, en la que no solamente se considere la protección de los recursos naturales y de la salud humana, si no el bienestar social de todas las comunidades del país, la promoción del empleo, la mejora de la competitividad del sector productivo, el acceso a la información y al conocimiento, la prevención o reducción de la generación de GEI y de contaminantes orgánicos persistentes son algunos aspectos que comprende el desarrollo.

Es decir, el manejo sustentable de los residuos no únicamente involucra la intervención de los servicios de saneamiento del municipio, sino también a las autoridades de los distintos órdenes de gobierno responsables del desarrollo económico y social, de la protección al ambiente y la salud, de la educación y desarrollo científico y tecnológico, de energía y otras, además de los sectores de la sociedad, considerando sobre todo que cada uno de ellos es generador de residuos y debe de responsabilizarse de la prevención de su generación, su minimización, valorización y manejo ambientalmente adecuado, asumiendo los costos que ello implique y las consecuencias de los daños que ellos ocasionen.

2. Marco teórico

Este capítulo lo integran el marco conceptual, marco legal, marco normativo y marco teórico sobre medio ambiente y desarrollo sustentable, residuos sólidos urbanos, análisis de ciclo de vida de materiales de construcción, evaluación de impactos ambientales y normatividad vigente a nivel global, nacional y local.

2.1 Marco conceptual

Dentro de este contexto se describen los conceptos que se utilizarán a lo largo del desarrollo de la tesis.

2.1.1 Sustentabilidad

El término de sustentabilidad fue empleado por primera vez en el informe de Brundtland en 1987, como la capacidad de satisfacer necesidades de la generación humana actual sin que esto suponga la anulación de que las generaciones futuras también puedan satisfacer las necesidades propias (Zarghami et al., 2019). Este concepto tomó fuerza en la década de 1990 basándose en tres ejes: economía, ecología y sociedad.

Sustentabilidad económica

La sustentabilidad económica es la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas (Calvente, 2007).

Sustentabilidad social

La sustentabilidad social se define como la capacidad de una sociedad en la cual el desarrollo económico, el bienestar social y la integración están unidos con un medioambiente de calidad. Esta tiene la capacidad de satisfacer sus necesidades actuales sin perjudicar la habilidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas (Calvente, 2007).

Sustentabilidad ambiental

En su concepto más puro la sustentabilidad ambiental se define como la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas y el medio natural (Bar-Kana & Guez, 1991).

2.1.2 Desarrollo sustentable

Años más tarde en el 2002 en la cumbre mundial llevada a cabo en Río de Janeiro aparece por vez primera el término de desarrollo sustentable que según la ley general de equilibrio ecológico y

protección al ambiente (LGEEPA) lo define como el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras (LGEEPA, 2018).

El desarrollo sustentable propone una serie de sistemas de calificación como técnicas de evaluación de edificios de acuerdo a sus características como son: Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED), la metodología de evaluación ambiental de edificios (BREEAM, por sus siglas en inglés), el Protocolo de construcción ecológica para edificios comerciales (GBI, por sus siglas en inglés) y Alta calidad ambiental (AQUA-HQE, por sus siglas en inglés).

Desarrollo urbano sustentable

Desarrollo urbano sustentable “una ciudad sustentable es aquella que ha creado una serie de políticas que pretendan asegurar la disponibilidad, utilización y reutilización de los recursos, así como la creación de un espacio óptimo que mejore la calidad de vida y el sentido de igualdad, que facilite el crecimiento económico, social, ecológico y que asegure la prosperidad a generaciones futuras (LGEEPA, 2018).

2.1.3 Ciclo de vida

El ciclo de vida según la norma ISO 14040 se define como las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

Análisis de ciclo de vida

Mientras que el ACV se utiliza como una herramienta para medir los impactos ambientales mediante la entrada y salida de energía de un sistema o producto a través del ciclo de vida, este consta de cuatro etapas que son: 1. Definición de objetivo y alcance, 2. Inventarios de ciclo de vida, 3. Evaluación de impactos de ciclo de vida y 4. Interpretación de resultados (Iso, 2006)

Objetivo y alcance

El objetivo y alcance debe estar bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido, e incluye el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas; la unidad funcional; los límites del sistema; los procedimientos de asignación; las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto, y la subsecuente interpretación a utilizar; requisitos relativos a los datos; las suposiciones; las limitaciones; los requisitos iniciales de calidad de los datos; el tipo de revisión crítica, si la hay y el tipo y formato del informe requerido para el estudio (Iso, 2006).

Análisis de inventarios

El análisis de inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto. El análisis es un proceso iterativo a medida que se recopilan los datos se aprende más sobre el sistema. Se debe recopilar las entradas de energía, de materia prima, entradas auxiliares u otras entradas físicas, los productos, coproductos y residuos, las emisiones al aire, los vertidos al agua, suelo y otros aspectos ambientales (ISO, 2006).

Evaluación de impactos

La evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV. Debe incluir la selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, asignación de resultados del ICV, cálculo de resultados del indicador de categoría, resultados de la EICV y elementos optativos como la cuantificación del valor de los resultados del indicador de categoría con respecto a la información de referencia, agrupación y ponderación (ISO, 2006).

Interpretación de resultados

La interpretación del ciclo de vida es la fase en la cual los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impactos se consideran juntos o, en el caso de estudios de ICV, solo se consideran los hallazgos de análisis de inventario. Esta fase puede involucrar un proceso iterativo de revisión y de actualización del alcance de un ACV, así como de la naturaleza y de la calidad de los datos recopilados de modo que sean coherentes con el objetivo definido (Iso, 2006).

En relación a lo anterior dentro de los ICV es importante destacar la importancia de la cuantificación de las extracciones, pues en la industria de la construcción se considera que el 50 % de los recursos mundiales se utilizan para la construcción generando a la vez una gran cantidad de residuos).

2.1.4 Residuos

Según la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR) define de Los residuos como un material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (LGPGIR, 2015). Los residuos pueden clasificarse según la (LGPGIR) en función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos son generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos peligrosos domiciliarios; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en vías y espacios públicos que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y espacios públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole(LGPGIR, 2017)

2.1.5 Residuos de manejo especial

Los residuos de manejo especial son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (LGPGIR, 2015).

2.1.6 Residuos de construcción y demolición

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son considerados residuos de manejo especial y es posible conocer la cantidad mediante el registro de planes de manejo de Manifiestos de Impacto Ambiental (MIA), donde el generador declara la cantidad de residuos y se estipula el manejo de los mismos, el documento incluye disposición final por empresas autorizadas; si es enviado a una planta de reciclaje. Sólo en la Ciudad de México en 2014 se registraron 1,503 MIA con una cantidad de residuos de la construcción de 12'003,359.51 metros cúbicos, 18,478.71 toneladas material ferroso y 26,151.94 toneladas de otro tipo de residuos (Programa de gestión integral de residuos sólidos, 2020). Es por ello, necesario el aprovechamiento de recursos, para recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundados o de energía (LGPGIR, 2017).

Inventarios de residuos

Lo anterior se requiere para realizar inventarios de residuos que es una base de datos en la cual se asientan con orden y clasificación los volúmenes de generación de los diferentes residuos, que se integran a partir de la información proporcionada por los generadores en los formatos establecidos para tal fin, de conformidad con lo dispuesto en este ordenamiento (LGPGIR, 2017). Esta base de datos servirá para establecer criterios del manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos de carácter especial y realizar una clasificación según (García et al., 2012).

Plan de manejo de residuos ver figura 2.1, es un instrumento de gestión que permite al particular y a la autoridad diseñar y controlar de una manera flexible el manejo integral de los residuos

peligrosos, mediante propuestas de manejo eficientes que minimicen la generación de los residuos y prioricen la valorización de los mismos.

Modalidades: los planes de manejo de residuos pueden establecer una o más de las siguientes modalidades.

- i. Atendiendo a los sujetos que intervienen en ellos, podrán ser:

Privados. Los instrumentos por los particulares que conforme a la ley se encuentran obligados a la elaboración, formulación e implementación de un plan de manejo de residuos.

Mixtos. Los que instrumenten los señalados en el inciso anterior con la participación de las autoridades en el ámbito de sus competencias.

- ii. Considerando la posibilidad de asociación de los sujetos obligados a su formulación y ejecución podrán ser:

Individuales. Aquellos en los cuales solo un sujeto obligado establece en un único plan, el manejo integral que dará a uno, varios o todos los residuos que genere.

Colectivos. Aquellos que determinan en manejo integral que se dará a uno o más residuos específicos y el cual puede elaborarse o aplicarse por varios sujetos obligados.

- iii. Conforme a su ámbito de aplicación, podrán ser:

Nacionales. Cuando se apliquen en todo el territorio nacional

Regionales. Cuando se apliquen en el territorio de dos o más estados, o de dos o más municipios del mismo estado

Locales. Cuando su aplicación sea en un solo estado, municipio

- iv. Atendiendo a la corriente del residuo.



Figura 2.1 Modalidades de los planes de manejo de los residuos de manejo especial

2.2 Clasificación de los residuos

La (LGPGIR, 2018) clasifica a los residuos según su naturaleza y composición como se muestra en la figura 2.2

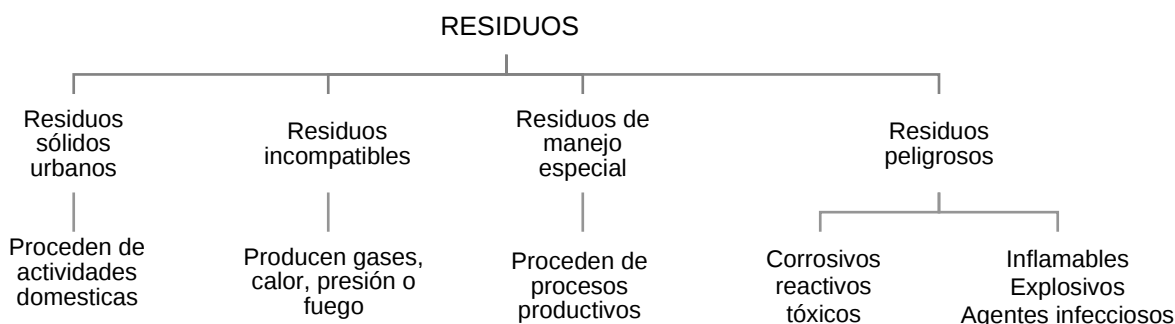


Figura 2.2 Clasificación de residuos de acuerdo a la normatividad

Por otra parte, la norma ambiental de la ciudad de México (NADF, 2015) establece los criterios para clasificar los Residuos de Manejo Especial para que las entidades federativas soliciten la clasificación de manejo especial para uno o varios residuos, se deberá cumplir con el criterio establecido en los puntos 6.1 o 6.2, pero invariablemente deberá cumplirse con el criterio establecido en el punto 6.3.

6.1 Que se generen en cualquier actividad relacionada con la extracción, beneficio, transformación, procesamiento y/o utilización de materiales para producir bienes y servicios, y que no reúnan características domiciliarias o no posean alguna de las características de peligrosidad en los términos de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

6.2 Que sea un Residuo Sólido Urbano generado por un gran generador en una cantidad igual o mayor a 10 toneladas al año y que requiera un manejo específico para su valorización y aprovechamiento.

6.3 Que sea un residuo, incluido en el Diagnóstico Básico Estatal para la Gestión Integral de Residuos de una o más Entidades Federativas, o en un Estudio Técnico-Económico. Así mismo enumera un listado de los materiales de manejo especial que requieren un plan de manejo donde menciona en el apartado número VII. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m³. Y que al año esta actividad genere 100 toneladas o su equivalente.

Los residuos de la construcción y demolición están constituidos por un conjunto de fragmentos o restos de materiales producto de la construcción, demolición, desmantelamiento y/o excavación, tales como tabiques, materiales pétreos, tierra, concreto, morteros, madera, alambre, resina, plásticos, yeso, cal, cerámica, tejados, pisos y varillas. Su composición puede variar dependiendo del tipo de proyecto, la obra y etapa de construcción (NADF, 2015).

Con el fin de promover el aprovechamiento de estos materiales, los residuos de la construcción y demolición se deben clasificar en las fracciones indicadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los residuos de la construcción y demolición y su posible reúso.

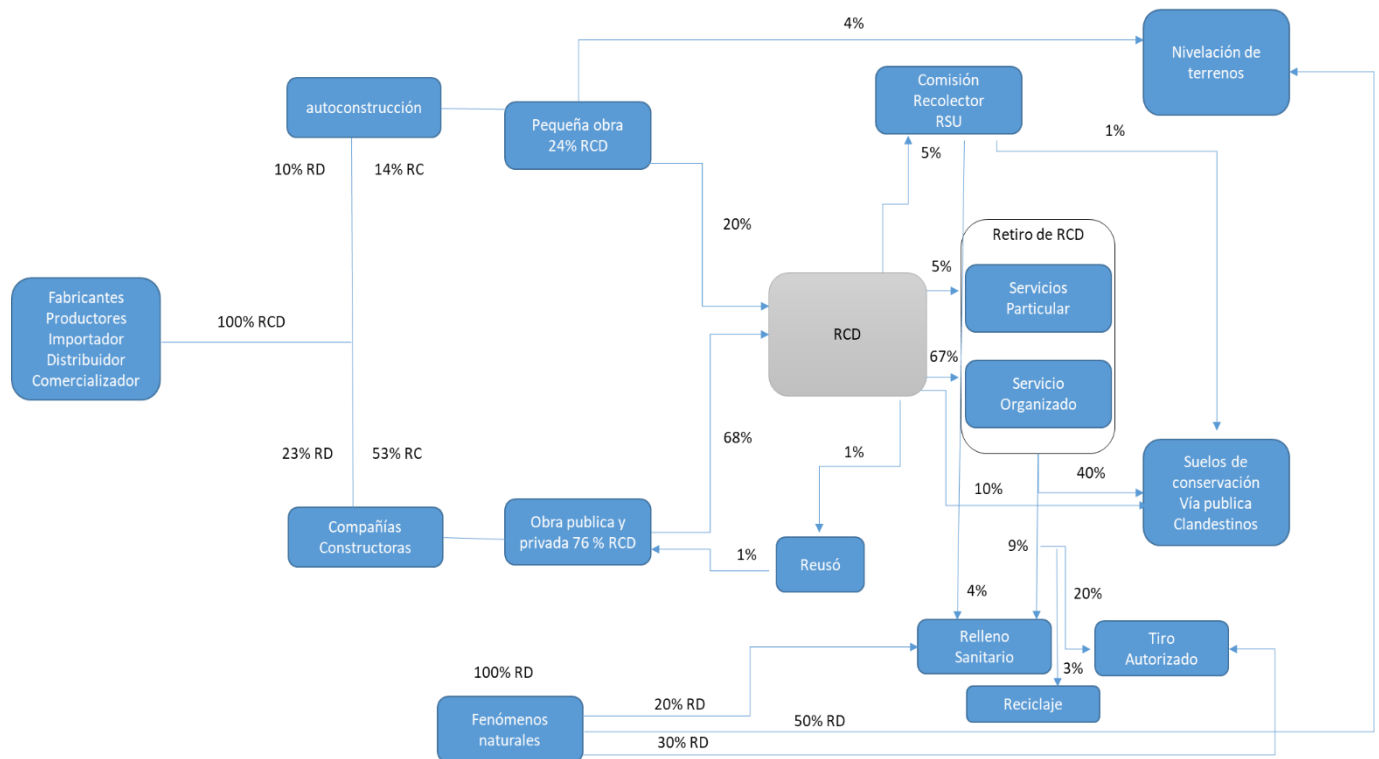
TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN	POSIBLE REÚSO *
A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS	
Elementos prefabricados. Elementos estructurales y no estructurales. Sobrantes de concreto en obra y premezclado.	Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos.
	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones
	Elaboración de productos prefabricados (Blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena).
	Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas.
	Construcción de andadores y trotapistas.
	Sub-bases en caminos y estacionamientos.
	Construcción de terraplenes.
	Construcción de pedraplenes
	Material para relleno o para la elaboración de suelo – cemento.
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas.
	Material para la conformación de terrenos.
	Rellenos en cimentaciones.
	Mobiliario urbano.
Construcción de muros divisorios.	
B. MEZCLADOS	
Concretos hidráulicos	Sub-bases en caminos y estacionamientos. Construcción de terraplenes. Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios. Construcción de andadores y trotapistas. Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas, Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas. Construcción de pedraplenes. Material para la conformación de terrenos** Relleno en jardineras Rellenos en cimentaciones.
Morteros	
Blocks	
Tabicones	
Adoquines	
Tubos de albañal	
Cerámicos	
Mamposterías	
Prefabricados de arcilla recocida	
(Tabiques, ladrillos, etc.),	
Piedra braza	
Agregados pétreos	
C. PROVENIENTES DE FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO*	
Carpeta asfáltica Bases negras	Bases asfálticas o negras.
	Concretos asfálticos elaborados en caliente.
	Concretos asfálticos templados o tibios.
	Concretos asfálticos elaborados en frío
D. RESIDUOS DE EXCAVACIÓN	
Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos.	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.
E. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	
Papel y Cartón Madera Metales Plástico	Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.
Residuos de podas, tala y jardinería. Vidrio	
Papel y Cartón	
Madera	

Fuente: (NADF, 2015)

2.3 Plan de manejo de RCD

El manejo que actualmente se le da a los RCD se muestra en la figura 2.3 donde se describen como fuentes de generación en las obras de autoconstrucción, las obras públicas y privadas y los residuos a partir de situaciones de desastre. Si bien la mayor parte de los RCD generados en las obras pequeñas son retirados por vehículos de carga privados, poco más del 5 %, son trasladados por los vehículos recolectores de RSU, y se estima que cerca del 10 % de los residuos se disponen en suelo de conservación o la vía pública (Romero, 2005).

Para el caso de las obras públicas y privadas se estima que el 67% de sus residuos son transportados por vehículos de carga privados, sin embargo, tan solo el 20% se dispone en sitios autorizados y un 3% se recicla, disponiendo el resto para re nivelación de terrenos, rellenos sanitarios y de manera inapropiada en suelos de conservación o vía pública.



Fuente: Cámara mexicana de la industria de la construcción.

Figura 2.3 Fuentes potenciales de generación de RSD y su disposición.

La problemática generada por el manejo actual de los RCD se distingue por la disposición sin separación ni tratamiento, frecuentemente en sitios clandestinos, de una mezcla de material de excavación, restos de ladrillos, azulejos, mortero, concreto, yeso, madera, plásticos, solventes, y

restos de pintura, metales y otros materiales utilizados en los procesos constructivos de obras, generan un impacto ambiental relevante.

Estos impactos ambientales a consecuencia del manejo inadecuado de los RCD, principalmente es la disposición final y se han identificado los siguientes: obstrucción de arroyos, canales y barrancas, afectación al drenaje natural, azolve de las partes bajas e inundación de zonas aledañas en temporada de lluvias, afección al medio físico y medio biótico (flora y fauna), foco de contaminación por mezcla de residuos, incluso peligrosos, contaminación de agua y suelo, incluso de acuíferos, afección de zonas de recarga de agua subterránea, impacto visual del entorno, proliferación de polvo (contaminación del aire) que provoca enfermedades respiratorias y la proliferación de fauna nociva.

Tabla 2.2 Identificación de usos propuestos de los RCD

Residuo	Material Reciclado	Aplicación
Carpeta hidráulica	reciclado frio	Base hidráulica y base negra.
Escombros mezclados	Material firme	Terraplenes
Escombros mezclados	arena reciclada	Cobertura en rellenos, sustituto de tepetate. Fabricación de blocks, bordillos, guarniciones, adocretos, adopastos, losetas, postes,
Escombros mezclados	agregados finos	Andadores y ciclopistas
Escombros mezclados	agregados reciclados	Camas de tuberías, acostillamiento y relleno. Relleno de cimentaciones. Pedraplenes. Relleno de azoteas y jardines. Conformación de terrenos
Escombros mezclados de concretos y morteros	Agregado Reciclado	Bases Hidráulicas en Caminos y Estacionamientos
Fresado de carpetas asfálticas	mezclas material asfáltico	Bases asfálticas o negras asfaltos calientes, templados y fríos, carreteras
residuos de concreto	grava y arena reciclada	Guarniciones y banquetas. Firmes de concreto. Construcción de muros.

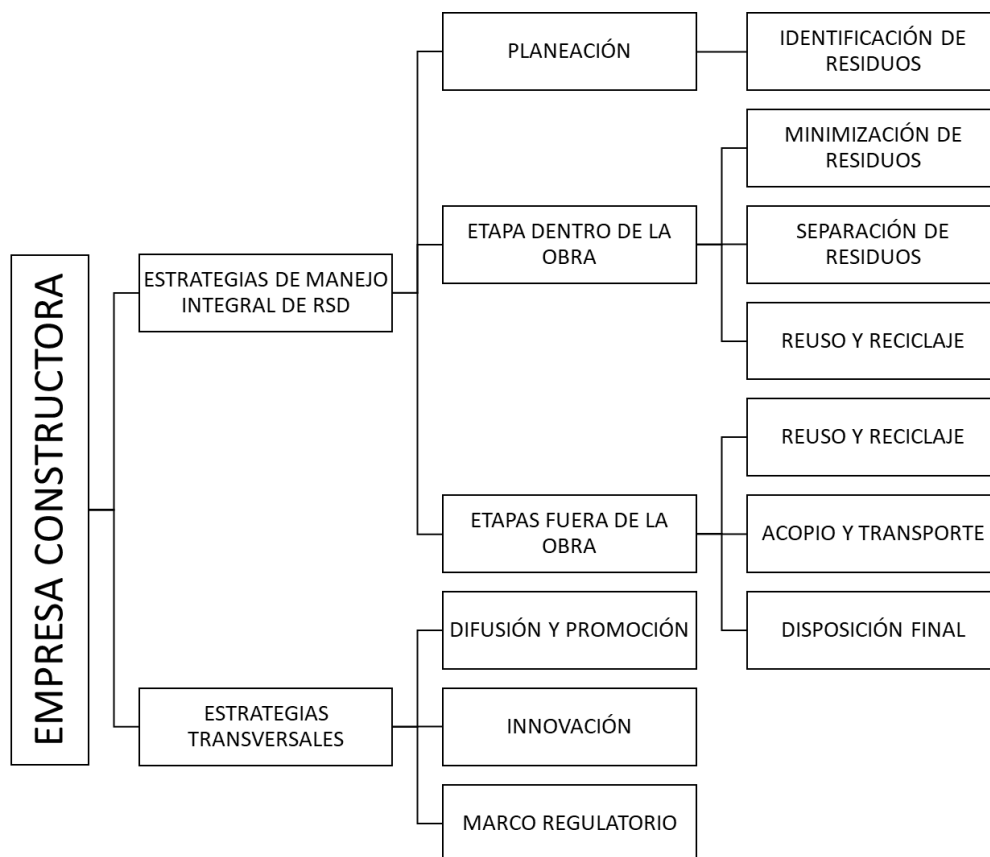
Fuente: Cámara mexicana de la industria de la construcción.

Los residuos generados del material producto de excavación, pueden ser aprovechados siempre que ello se especifique en el proyecto y cuidando que la legislación local vigente permita el aprovechamiento o reúso.

2.3.1 Estrategias y metas del plan nacional de manejo de RCD

Considerando las características y particularidades de la industria de la construcción, se desarrollaron estrategias para el manejo de los residuos, desde la fase de planeación inicial, dentro de la obra en la ejecución de los trabajos y fuera de obra con el traslado final de los residuos, ya sea a centros de reciclaje o disposición final.

A modo de reforzar el esquema antes planteado se proponen estrategias de difusión, capacitación y relacionadas con el marco regulatorio que coadyuven al cumplimiento de las primeras y que se ejemplifican en la figura 2.4, Para cada una de las estrategias se establecen metas que permitirán evaluar los alcances del plan de manejo.



Fuente: Cámara mexicana de la industria de la construcción.

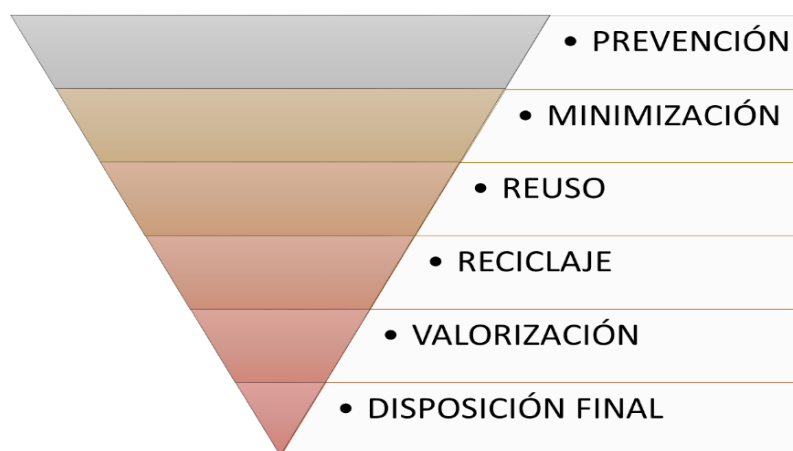
Figura 2.4 Estrategias del plan de manejo de la cámara mexicana de la industria de la construcción

2.4 Jerarquía de residuos

Desarrollar estrategias para el problema que representan los residuos en el país la agenda 2030 enfocada a la minimización de residuos o cero residuos propone trabajar íntegramente con una visión de economía circular, donde el aprovechamiento de las materias primas sea prioritario en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o material (SEMARNAT, 2019)

Es decir, la jerarquía del manejo de los residuos donde la prevención y minimización antepone a la disposición final de residuos del país y así atender la serie de necesidades que requiere la gestión, mediante los instrumentos del marco legal, para aumentar la capacidad de valorización del sistema económico, establecer la separación de los residuos desde el origen, fomentar el reciclaje y establecer una auditoría en lo referente a la disposición final, bajo un modelo de negocio sustentable y orientado a la economía circular.

La agenda 2030 de cero residuos presenta un esquema para jerarquizar la gestión de los residuos como se muestran en la figura 2.5

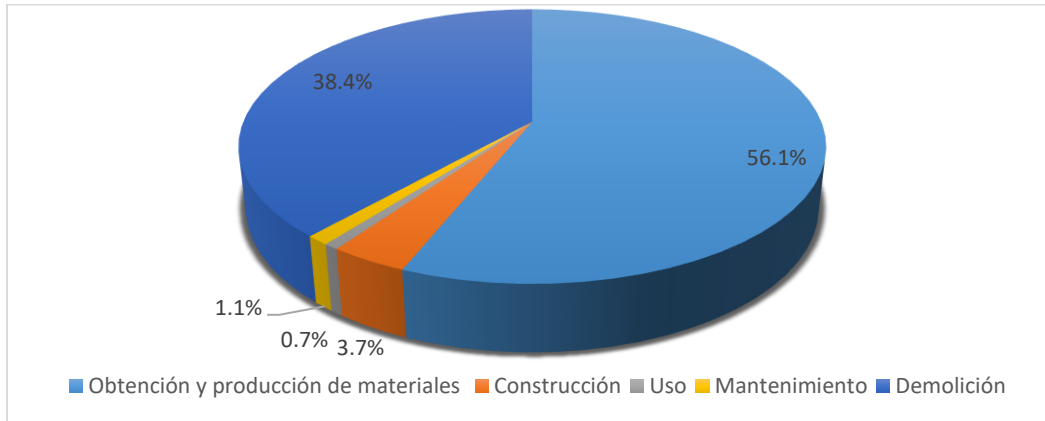


Fuente: (SEMARNAT, 2019).

Figura 2.5 Jerarquía de residuos.

2.5 Generación de RCD por etapas

El ciclo de vida de un edificio consiste en una serie de fases de largo recorrido que van desde la obtención de materias primas hasta la demolición final, considerando la fabricación de materiales y componentes, la ejecución de la construcción, el uso, mantenimiento y reparaciones, en todas estas fases se generan residuos que fácilmente podrían ser devueltos al ciclo de vida para un nuevo uso. En la gráfica se entiende que las fases de mayor generación de residuos son la fase de obtención de materias primas y producción de materiales y la demolición total del edificio al final de su vida útil (Del Río Merino et al., 2017)



Fuente: (Del Río Merino et al., 2017)

Figura 2.6 Generación de residuos de las fases de ciclo de vida de un edificio

2.5.1 Estimación de RC

La cantidad de residuos generada para la fase de las actividades de construcción de edificios residenciales se puede calcular con las siguientes consideraciones, como (C, toneladas métricas/año) que puede ser estimado como el producto del área de la actividad de la construcción y la generación de residuos por unidad de área de construcción. En casos donde el área total de construcción (m²) no esté disponible directamente, se puede estimar dividiendo el valor total de la actividad de la construcción (a_c, \$ / año). por el costo promedio por el área total de construcción (b, \$/m²), de acuerdo a estas consideraciones se presenta la ecuación para predecir la generación de escombros para las actividades de la construcción de edificios donde C_n, (Kg/m²) es el peso de los residuos por área unitaria de la construcción de edificios n y b_n es el porcentaje de la construcción total que utiliza un sistema constructivo entramado n para cualquier número i de tipos de entramados, ver ecuación 1 (Cochran et al., 2007).

$$C = \frac{a_c}{b} \sum_{n=1}^i (C_n \times b_n)$$

Ecuación 1: Estimación de los RC

2.5.2 Estimación de RD

Para determinar una cantidad de RD generados puede estimarse como el producto del área de actividad y la generación de residuos por área, Cuando una estimación del área total de actividad no está disponible, esta cantidad puede determinarse como el producto del costo total de actividad de demolición (a_d, \$) y una estimación del costo por unidad de área de demolición (g, \$ / m²). se requiere un método para determinar qué porcentaje (a) representa la demografía residencial o no residencial. liciones (como datos locales o una encuesta de contratos de

demolición (ton). Se han construido muchos tipos diferentes de casas y edificios construidos en el siglo pasado.

Pesos de generación apropiados por unidad de área ($f_n, \text{kg/m}^2$) debe usarse para tener en cuenta estas diferencias entre los múltiples estilos de construcción. Además, el porcentaje de demoliciones que representan estos diversos tipos de viviendas (l_n) también debe determinarse. La ecuación 1 presenta el cálculo para residuos de demolición donde n presenta un sistema constructivo para un i número de sistemas constructivos (Cochran et al., 2007).

2.6 Marco normativo

Este apartado se integra de la revisión de las leyes internacionales donde tiene participación México y las leyes nacionales, estatales y municipales con el enfoque en los residuos de construcción y demolición.

2.7 Legislación internaciones de residuos de construcción

La organización de las naciones unidas (ONU) estable 17 objetivos a lograr para el año 2030 entre ellos estan, El fin de la pobreza, Agua limpia y saneamiento. Energía asequible y no contaminante, Trabajo decente y crecimiento económico, Industria, innovación e infraestructura, Ciudades y comunidades sostenibles, Producción y consumo responsables, y Acción por el clima entre otros (ONU, 2015). Dentro de estos objetivos es importante destacar la importancia de construir ciudades sustentables que permitan tomar acciones en materia del medio ambiente.

Las ciudades y las áreas metropolitanas son vitales para el crecimiento económico, ya que contribuyen al 60 % aproximadamente del PIB mundial. Sin embargo, también representan alrededor del 70 % de las emisiones de carbono mundiales y más del 60 % del uso de recursos. Esto conlleva como resultado un número creciente de habitantes en barrios pobres, infraestructuras y servicios inadecuados y sobrecargados (como la recogida de residuos y los sistemas de agua y saneamiento, carreteras y transporte), lo cual está empeorando la contaminación del aire y el crecimiento urbano incontrolado (ONU, 2015).

2.8 Legislación nacional ambiental de residuos sólidos de manejo especial

Es facultad de la federación lo dispuesto en el artículo 7 fracción I el Formular, conducir y evaluar la política nacional en materia de residuos, así como elaborar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión

Integral de los Residuos de Manejo Especial y el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados y coordinar su instrumentación con las entidades federativas y municipios, en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática, establecido en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (LGPGIR, 2015)

El reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (RLGPGIR) indica en el artículo 11 que la determinación para clasificar a un residuo como de manejo especial, en términos del artículo 19, fracción IX, de la Ley, se establecerá en la norma oficial mexicana correspondiente (RLGPGIRS, 2014).

Y que estas normas deberán contener: I. Los criterios que deberán tomarse en consideración para determinar los residuos sólidos urbanos y de manejo especial que estarán sujetos a plan de manejo; II. Los criterios para la elaboración de los listados; III. Los listados de los residuos sujetos a planes de manejo; IV. Los criterios que se tomarán en cuenta para la inclusión y exclusión de residuos en los listados, a solicitud de las entidades federativas y municipios; V. El tipo de plan de manejo, atendiendo a las características de los residuos y los mecanismos de control correspondientes, y VI. Los elementos y procedimientos que deberán tomarse en consideración en la elaboración e implementación de los planes de manejo correspondientes (RLGPGIRS, 2014). Por otra parte, la ley general del equilibrio y la protección al ambiente (LGEEPA), en el capítulo II preservación y aprovechamiento sustentable del suelo y recursos en el artículo 98, fracción VI menciona que la realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural (LGEEPA, 2018).

2.9 Legislación estatal y municipal de residuos sólidos de manejo especial

La LGPGIR establece en el artículo 9 fracción III. Autorizar el manejo integral de residuos de manejo especial, e identificar los que dentro de su territorio puedan estar sujetos a planes de manejo, en coordinación con la Federación y de conformidad con el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial y el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (LGPGIR, 2015).

El reglamento del desarrollo sustentable del estado de Sinaloa en la sección II relacionado a los residuos de manejo especial en el artículo 80 la clasifica conforme lo establece el artículo 19 de la ley de residuos, para el caso de este trabajo solo se incluirá la definición que aplica el tipo de residuos que se generan en los procesos constructivos.

- i. Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que solo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de rocas, excluidos de la competencia federal conforme a las fracciones IV y V del artículo 5 de la ley minera.
- ii. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general.

En el artículo 81, se establece quienes serán considerados como generadores de residuos de manejo especial, de acuerdo a lo establecido en la ley de residuos. En el artículo 82 se establecen las responsabilidades que tiene los generadores de residuos de manejo especial. En el artículo 84, se establecen las prohibiciones de lugares para disponer estos residuos,

3. Metodología

Esta investigación se realizó en el municipio y ciudad de Mazatlán Sinaloa, con una población de 502,547 habitantes y se ubica en los límites colindantes con los municipios de Concordia, San Ignacio y El Rosario. En lo referente a las condiciones de vivienda se distingue por tener 146,636 hogares familiares, sin embargo, el puerto de Mazatlán recibe más de 598 000 turistas anualmente y la relación existente entre la oferta y la demanda de habitaciones en hoteles ha sido superada por lo que los desarrolladores implementan la construcción de torres de departamentos en la zona costera y turística, con el fin de resolver la necesidad de hospedaje y que puedan estos ofrecer mejor confort y amplitud a los visitantes, brindándoles de 2 a 3 habitaciones por departamento y que adquieran los departamentos lo puedan arrendar mediante aplicaciones.

En la actualidad existen 100 proyectos de obras de construcción en desarrollo de los cuales 12 proyectos son torres departamentales, y al menos uno de ellos será construido en el espacio en el que se tuvo que demoler una torre existente, esto abre camino a que se generen demoliciones de construcciones existentes para desarrollos inmobiliarios modernos. Es por ello que se requiere de manera inaplazable controlar el tema de los impactos ambientales asociados a la industria de la construcción, a consecuencia de la construcción y demolición, que genera el desarrollo habitacional, a través de la metodología de análisis de ciclo de vida, para establecer mejoras en los procesos, establecer un plan de manejo de residuos de manejo especial, y obtener indicadores de sustentabilidad en la construcción.

Para la obtención de resultados, se utilizaron dos programas para estimar el impacto ambiental de la edificación. Uno de ellos es el estimador de impactos para la construcción de Athena (Athena for Building), que considera los sistemas constructivos y materiales utilizados, incluyendo dimensiones, espesores, resistencias, entre otros. Sin embargo presenta una limitante en la base de datos, donde los recursos como maquinaria, energía y combustible utilizado en cada fase del ciclo de vida de la construcción no pueden ser modificados, esto nos permite identificar en la etapa de resultados cuales fases del ACV son de mayor importancia a destacar e investigar posibles escenarios para disminuir la carga ambiental registrada, mientras el programa Simapro se aplicó para ajustar las bases de datos o seleccionar equipamiento, energía realmente utilizada así, como los combustibles y la maquinaria pesada de transporte, también se usó para construir los escenarios y compararlos, dejando imposibilitada la comparación de los resultados de un programa contra otro.

Por otra parte, en la figura 3.1 se presenta el diagrama de la metodología a seguir en esta investigación. Ésta consiste en dos etapas generales, la primera de ellas corresponde al análisis

de los materiales predominantemente utilizados para la construcción de vivienda, y realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) de estos, considerando las cuatro etapas del ACV.

Definición de objetivo y alcance. Para el análisis del ciclo de vida del proceso constructivo se consideraron las etapas de adquisición de materias prima (materiales), construcción y reciclado de residuos de construcción y demolición. La unidad funcional seleccionada para el estudio fue la construcción de 1,000 m² de construcción de un desarrollo urbano vertical en la ciudad de Mazatlán.

Se evaluaron tres escenarios considerando el tiempo de ciclo de vida del edificio, es decir, una evaluación comparativa de los impactos ambientales en periodos de 85 años, 100 años y 150 años de vida útil (etapas A1 a D). En el segundo escenario, se evaluó el consumo de energía en la etapa de uso del edificio, para ello se consideró desde B1 a B7, basándose en la evaluación de la situación actual. Además, se analizó un tercer escenario de materiales, comparando bloques de concreto, insulpanel, Steel Stud y muros de cristal con cristales abatibles (etapas A1 a D). Para cada escenario, se incluyeron las siguientes etapas del ciclo de vida del proceso constructivo.

Etapas fabricación de materiales. En esta etapa se incluyó la adquisición de materias primas y transporte requerido, así mismo se consideraron las cantidades de materiales comúnmente utilizados en la zona de estudio.

Etapas de construcción. En esta etapa, se incluyeron los procesos asociados a la construcción de un desarrollo urbano vertical en la ciudad de Mazatlán, (transporte, consumo de recursos, materiales y energía).

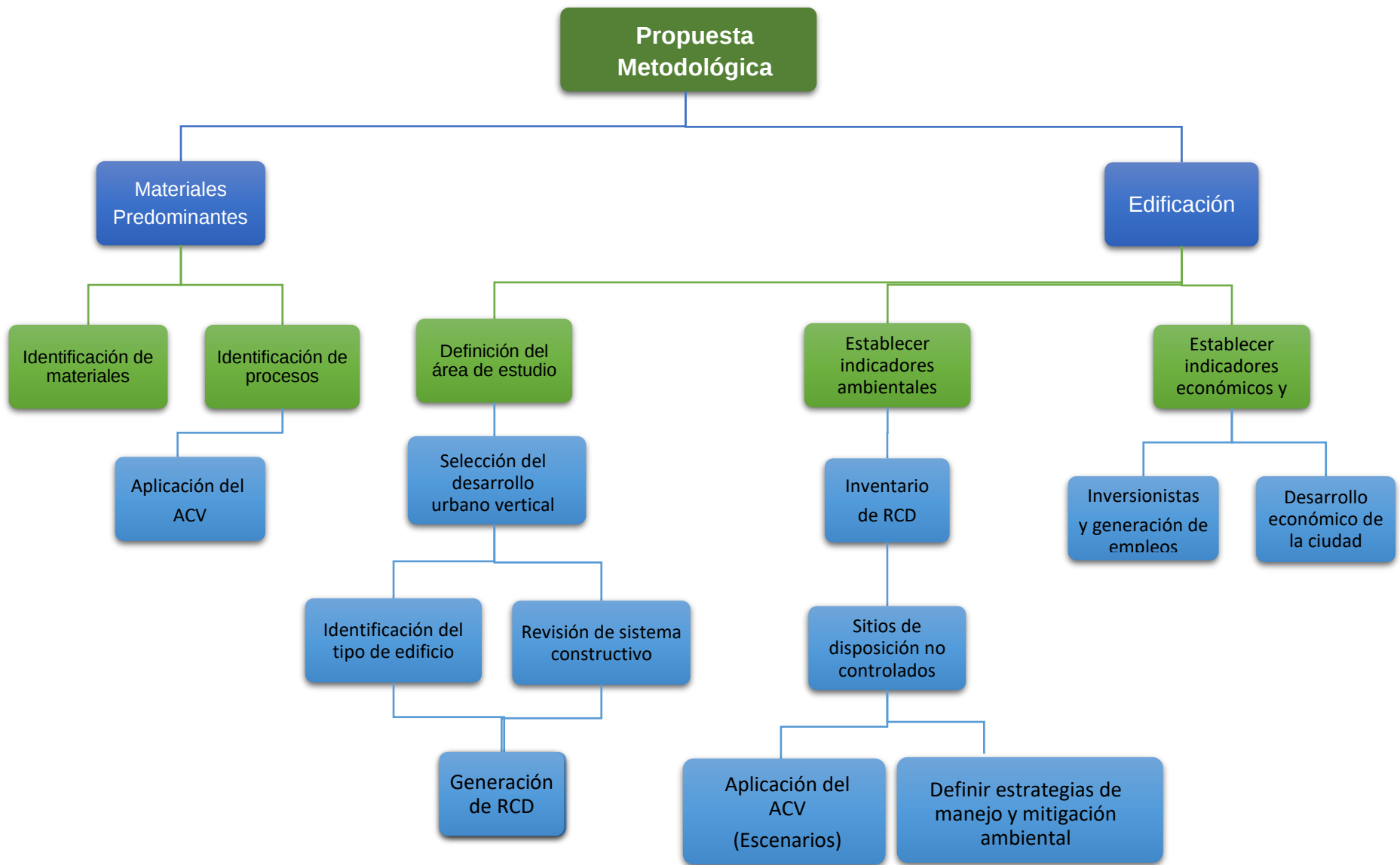
Etapas de uso. Durante esta etapa, se consideraron las condiciones de mantenimiento, reparación, reemplazamiento, renovación, energía operacional y el agua requerida para la operación del edificio.

Etapas de fin de vida. En esta etapa se incluyeron la demolición, el transporte de residuos a la planta de tratamiento, el tratamiento de los residuos y la disposición de los RCD generados (Generación estimada, distancia, porcentaje de recuperación y costos).

Etapas de recuperación o cargas evitadas en el ciclo de vida del edificio.

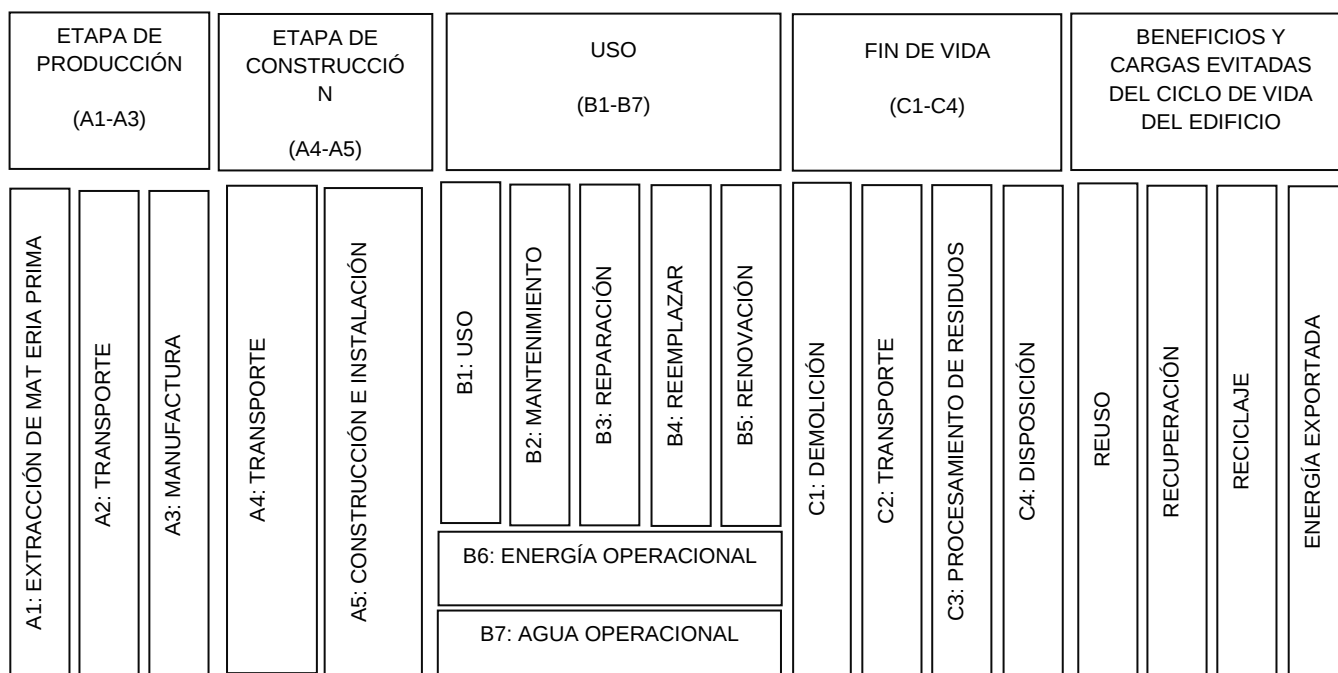
En esta etapa se incluyó el reúso de materiales, la recuperación, el reciclaje y la energía exportada.

Análisis de inventario. Para el inventario de materiales y consumos de energía y combustible, se realizó trabajo de campo, visitando las empresas constructoras y de fuentes secundarias. Considerando que las bases de datos en su mayoría son de países en condiciones distintas a la zona de estudio, se realizaron estimaciones e incluyeron en el análisis para ajustar la información a la situación local, las fuentes primarias de información, fueron la empresa constructoras y proveedores, entre otras; la fuente secundaria que se usó fue la base de datos Ecoinvent.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1 Diagrama general de metodología



Fuente: norma UNE EN 15879.

Figura 3.2 Etapas de ciclo de vida propuestas por la norma UNE EN 15879

Para la etapa del inventario, se obtuvo la información del trabajo de campo, para ello se visitaron las empresas que producen materiales en la región los cuales se utilizaron en la construcción del desarrollo urbano vertical analizado.

En la etapa de construcción, también se visitó constantemente el sitio, para documentar los procesos y materiales utilizados en cada etapa de la construcción, se generó información sobre la adquisición de materiales importados, dimensiones de elementos constructivos y espesores de materiales de construcción que fueron utilizados, también se obtuvo el inventario de los residuos de construcción generados, tomando como referencia la unidad funcional propuesta y los procesos para disponer los residuos, así mismo se visitaron los lugares donde son depositados los residuos de construcción generados por este desarrollo, también se identificaron los materiales que fueron utilizados para otro desarrollo urbano vertical, como una práctica de reúso para minimizar los residuos de construcción.

Para el inventario de los residuos generados, se cuantificó el volumen de residuos enviados a disposición final tomando como unidad de medida un camión de volteo con un volumen de 14 m³ de residuos mixtos, para la unidad funcional que se estableció para este estudio, se consideraron 21 camiones. Dado que los flujos de los residuos recorren distintos pisos y son dispuesto en el mismo lugar de transferencia en la construcción, se determinó el siguiente procedimiento para cuantificarlos:

1. Separar en piso, los materiales reciclables y potencialmente reciclables.

2. Disponer en el punto de transferencia los materiales enviados a través del ducto vertical (chute) que viaja a través de todos los niveles del edificio.
3. Se trasladaron, del sitio de acopio en la construcción a punto de transferencia usando una carretilla de 85 litros o 0.085 m^3 .
4. Se cuantificaron para un los RCD para un departamento.

Los resultados de la cuantificación, fueron 7 m^3 de residuos por departamento equivalente a una carretilla por m^2 de construcción.

Para el caso de Athena se trabajó con inventarios de los elementos que integran un proceso constructivo que componen el edificio; como vigas, columnas, losa de azotea, losa de entrepiso, muros, ventanas, puertas, pintura, cerámica, muebles de madera como se presentan en la tabla 3.1.

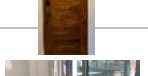
Se trabajó con la unidad funcional establecida (1000 m^2 de construcción), donde se ven cimientos que se consideran 1500 m^2 de concreto, sin embargo se promedió este volumen en el total de niveles del edificio, se construyeron 18 columnas de concreto de $1.20\text{m} \times 1.00\text{m}$ de sección transversal y con una altura de 4m , se construyeron 21 elementos de vigas de sección de $1.20\text{m} \times 1.00\text{m} \times 30\text{m}$ de longitud, para el firme y la losa de cubierta se consideran concretos aligerados de espesor de 0.20 m con sección de $50 \times 20\text{m}$ para el muro de block de concreto se calcularon $609.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ de altura, por la altura del plafón no se llega a los 4m de columna, los materiales de acabados en muro, como yeso, mortero y pintura están en función de los m^2 de muro.

Con relación a los acabados en pisos, como la cerámica, se trabajó el inventario con base a los m^2 de firme, así como los materiales de hoyo de yeso en plafones está en función a los m^2 de losa de cubierta, las protecciones como puertas y ventanas se consideran de acuerdo a los vanos en muros, donde se colocan 50 puertas por unidad funcional de madera solida con altura de 3.1m así mismo se colocan dos tipos de ventanas de dimensiones de $2.40\text{m} \times 3.10 \text{ m}$ y de $1.00 \times 1.20 \text{ m}$ con cristal 3mm y 6 mm respectivamente, con marco de aluminio natural, prefabricadas.

Para el caso de Simapro se ingresó el inventario de materiales y energía requerido para cada una de los procesos de la etapa de producción, etapa de construcción, etapa de uso considerando únicamente la energía operacional.

Para la etapa de fin de vida únicamente se incluyó la disposición final y en la etapa de beneficios y cargas evitadas se incluyó únicamente el reciclaje que pudieran tener los materiales en función a lo que se recicla actualmente, sin considerar mejoras para el reciclaje en el futuro. Como se muestran en los formatos de inventarios que se encuentran en anexo 1.

Tabla 3.1 Materiales introducidos en Athena

CLAVE	ELEMENTO CONSTRUCTIVO	MATERIALES UTILIZADOS	PIEZAS	DIMENSIONES (m)	VOLUMEN en 1000 m ³	IMAGEN
1	CIMENTOS	CONCRETO-ACERO	1	20X50X1.5	1500 m ³	
2	COLUMNAS	CONCRETO-ACERO	18	4.00X1.00X1.20	93.6	
3	VIGAS	CONCRETO-ACERO	21	1.20X1.00X30	601.5	
4	FIRME	CONCRETO-ACERO	1	50X20X0.20	200	
5	AZOTEA	CONCRETO-ACERO	1	50X20X0.20	200	
6	MUROS	BLOCK DE CONCRETO	1	609.5X3.5	319.99	
7	RECUBRIMIENTO MURO	YESO	1	609.5X.0254X3.5	54.18	
8	RECUBRIMIENTO MURO	MORTERO-CEMENTO	1	609.5X.0254X3.6	54.18	
9	RECUBRIMIENTO MURO	PINTURA	1	609.5X.0254X3.7	2133.25	
10	RECUBRIMIENTO FIRME	CERAMICA	1	50X20	1000	
11	RECUBRIMIENTO LOSA	HOJA DE YESO	1	50X20	1000	
12	RECUBRIMIENTO LOSA	PINTURA	1	50X20	1000	
13	PUERTAS	MADERA	50	2.4X3.1	9.4488	
14	VENTANAS	CRISTAL 3MM	205	2.40X3.10 1.00X1.20	0.645	

Fuente: elaboración propia a partir de datos de inventarios

Evaluación de impactos ambientales. Para esta etapa se incluyeron las categorías de impacto, que más se han utilizado, de acuerdo a la literatura, aplicando los factores de caracterización propuestos por el método CML (2000), ver tabla 3.2, estas categorías de impacto fueron evaluadas para ambas propuestas utilizadas en las herramientas de evaluación Athena y Simapro.

Tabla 3.2 Categorías de evaluación de impacto

CATEGORÍAS ACV	UNIDAD
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ eq
Potencial de acidificación	kg SO ₂ eq
Partículas suspendidas	kg PM2.5 eq
Potencial de eutrofización	kg N eq
Potencial de destrucción de capa de ozono	kg CFC-11 eq
Potencial de smog	kg O ₃ eq
Energía primaria total	MJ
Energía no renovable	MJ
Consumo de combustible fósil	MJ

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos del manual de Athena for building

Interpretación de resultados. En esta etapa se identificaron procesos y/o materiales que contribuyen en mayor proporción al impacto ambiental a través del traslape del inventario y la aplicación del método de evaluación de impactos. Los resultados fueron traducidos en potenciales cambios en procesos, consumos y/o materiales que produzcan una mejora ambiental.

En la segunda fase de la metodología que se describió en la figura 3.1 está relacionado con los indicadores ambientales, económicos y sociales, para ello se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Se definió el área de estudio, para ello se seleccionó un desarrollo urbano vertical en construcción, se revisaron los sistemas constructivos utilizados para la ejecución del proyecto, los materiales y los consumos de energías en los procesos, además se analizaron las etapas de uso, la vida final y los tratamientos que recibirán los materiales de acuerdo a la normativa vigente. Para cada escenario se analizaron los resultados por separado considerando los impactos medio ambientales de mayor relevancia en el análisis.

Luego se aplicó el ACV para la etapa de uso del edificio seleccionado, se evaluó el consumo de materiales y energía, además para el tema de los indicadores ambientales, también se incluyó la etapa de tratamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD), para ello se visitaron las unidades de transferencia y disposición para obtener los inventarios, para ello fue necesario

identificar y analizar el manejo de los RCD y proponer estrategias de manejo de RCD con enfoque de economía circular.

3.1 Análisis de ciclo de vida del edificio

Para el caso de estudio planteado se analizó de acuerdo a las siguientes consideraciones Definición de objetivo y alcance. Para el análisis del ciclo de vida del proceso constructivo se consideraron las etapas de adquisición de materias primas (materiales), construcción y reciclado de residuos de construcción y demolición. La unidad funcional seleccionada para el estudio de los materiales fue 1000 m² de construcción que incluyó, estructura, muros de envolvente, muros divisorios terminados, plafones, recubrimientos, pintura, maderas. Se evaluaron dos escenarios considerando mejoras (en uso/tipo/adquisición de materiales, energía, procesos) con base a la evaluación de la situación actual. Para cada uno de estos escenarios se consideraron las siguientes etapas del ciclo de vida del proceso constructivo:

A) Etapa de adquisición de materiales, en la que se consideran los porcentajes de materiales comúnmente utilizados en la zona de estudio y consumos de combustible de traslado.

Tabla 3.3 Definición de los materiales a analizar

N.º de material	Nombre del material	Descripción del proveedor	Fabricante	Fecha de inventario	Unidad funcional
1	Cemento	Proveedor local	Cemex	24/11/2021	Ton
2	Concreto industrial	Proveedor local	Cemex	24/11/2021	Ton
3	Block común	Proveedor local	Sinaloa Block	24/11/2021	Kg
4	Tabique	Proveedor local	Ladrillos y tabiques Mazatlán	24/11/2021	Kg
5	Cerámicos	Proveedor externo		24/11/2021	Ton
6	Madera	Proveedor externo	Araucco	24/11/2021	Kg

Fuente: Elaboración propia

B) Etapa de construcción. Se incluyeron todos los procesos asociados a la construcción de un desarrollo urbano en Mazatlán, (distancias, tiempo, consumo de recursos, materiales y energía).

Tabla 3.4 Etapas de construcción

N.º de etapa	Etapa de construcción	Descripción del proceso	Fabricante	Fecha de inventario	Unidad funcional
1	Cimientos	Excavación, colocación de acero-concreto, compactación	Contratista local	24/02/2022	m ²
2	Estructura	Colocación de acero y concreto	Contratista local	24/03/2022	m ²
3	Albañilería	Colocación de mampostería	Contratista local	24/03/2022	m ²
4	Acabados	Colocación de cerámicos y pinturas	Contratista local	24/04/2022	m ²
5	Carpintería	Colocación de puertas y muebles	Contratista local	24/06/2022	m ²

Fuente: Elaboración propia

C) Etapa de reciclado de residuos de construcción y demolición, en esta se incluyó el transporte de residuos a la planta de tratamiento. (Generación estimada, distancia, porcentaje de recuperación).

Tabla 3.5 Etapas de generación de residuos de construcción y demolición a analizar

N.º de etapa	Etapa de generación	Descripción del proceso	Tratamiento	Fecha de inventario	Unidad funcional
1	Residuos de construcción	Materiales productos de las mermas generadas en obra	Disposición final	06/04/2022	m ²
			Reciclado		
			Reúso		
			Valorización		
			Recuperación		
2	Residuos de demolición	Materiales producto de demoliciones por reconstrucción total o parcial	Disposición final	06/08/2022	m ²
			Reciclado		
			Reúso		
			Valorización		
			Recuperación		

Fuente: Elaboración propia

Luego se aplicó el ACV para el uso del edificio, evaluando el consumo de materiales y energía, otro aspecto que está relacionado con los indicadores ambientales es el tratamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) haciendo revisión de inventarios en las diferentes unidades de transferencia y disposición final, para ello se analizó el manejo de los RCD y proponer estrategias de manejo de RCD con enfoque de economía circular.

La metodología general para el ACV para todos los sectores sigue el marco de cuatro etapas recomendado por ISO 14040 E ISO 14044, dicha metodología consta de 1) definición de objetivo y alcance, 2) inventario de ciclo de vida (ICV), 3) análisis de ciclo de vida, y 4) interpretación de resultados. La metodología específica para el ACV en obras de construcción se detalla en la norma europea EN 15978, que cubre los aspectos ambientales, económicos y sociales de la sostenibilidad, la evaluación ambiental se realiza de acuerdo con un marco modular recomendado en la EN 15978 para ACV a nivel de edificio completo y por EN 15804 para ACV a nivel de producto ver figura 3.1. Estas normas introdujeron un concepto modular para la definición de los límites del sistema como se muestra en la figura, los impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida del edificio se asignan a la etapa en la que ocurren, lo que permite una total transparencia de los resultados. La información incluida en cada módulo es la siguiente:

1. Etapa de producto (módulos A1 a A3): Incluye la producción de materiales de construcción desde el suministro de la materia prima hasta la perda de fabrica
2. Etapa de construcción (módulos A4 a A5): Incluye el transporte de materiales de construcción al sitio de construcción y el proceso de construcción

3. Etapa de uso (módulos B1 a B7): Incluye todos los elementos relacionados con el uso del edificio, reparación, reposición, rehabilitación y el uso de la energía y el agua
4. Etapa de fin de vida (Módulos C1 a C4): Incluye datos relacionados con la demolición/desmantelamiento del edificio
5. Un módulo adicional D, el cual asigna los beneficios netos debidos a la posible reutilización o reciclaje de materiales más allá del ciclo de vida del edificio.

3.1.1 Definición de objetivo y alcance

En esta etapa se definieron el propósito, los objetivos, los límites funcionales y del sistema de análisis de la investigación, el objetivo de esta investigación fue obtener indicadores ambientales de un edificio vertical construido con materiales convencionales que se utilizaron en su estructura y envolvente como concreto armado con varilla de acero corrugado, losas aligeradas, en muros se utilizaron materiales de block de cemento y recubiertos de yeso y cemento, en plafones se utilizó hoja de yeso, cerámica en recubrimientos de piso, se consideraron materiales secundarios como maderas finas, en puertas y carpinterías, así como cristales y aluminio de los marcos para ventanas, los materiales de plomería son descartados. Como unidad funcional se seleccionó una planta tipo que corresponde a 10 departamentos de la torre en cuestión equivalentes a 1000 m² de construcción, siendo una torre de 27 niveles y su área de construcción supera los 32,400 m² de construcción. Los límites del sistema que se evaluaron en esta investigación se definieron según la norma EN 15978 desde la cuna hasta la tumba, es decir, desde (A1-A3) correspondiente a la etapa de producción, la etapa de construcción (A4-A5), la etapa de uso (B1-B7), la etapa de fin de vida (C1-C4) adicional a estas etapas se incluyó la etapa de más allá de la vida útil del edificio.

3.1.2 Inventario de ciclo de vida

En esta etapa se definieron las entradas y salidas de materia y energía del sistema analizado, de acuerdo a las etapas que establece la norma EN 15978, para ello se identificaron los materiales de construcción para la edificación del edificio, se cuantificaron los materiales, en esta etapa existe un software con capacidades para calcular de manera precisa la cantidad de material requerido para la construcción del proyecto, sin embargo se decidió calcular el material requerido mediante tablas de generación de material, considerando materiales de estructura y envolvente, así como los cerámicos y las cantidades de material utilizado en obra para recubrimientos en muro, pues por ser un trabajo hecho a mano, regularmente se requiere revisar espesores para su cuantificación.

Por otro lado, se optó por asistir a las fábricas de materiales de construcción utilizados en el edificio y hacer inventario de los procesos generados en ellas, para definir las entradas y salidas de materiales, estos inventarios se presentan en la sección de anexos, se realizaron conforme a la

normativa ISO 14040, considerando así la geolocalización para el transporte de los materiales al sitio, para estimar los impactos ambientales generados durante cada proceso se utilizará el software Athena; éste contiene bases de datos específicas para la industria de la construcción.

3.1.3 Evaluación de ciclo de vida

Durante esta etapa del ACV se cuantificaron los impactos ambientales generados, utilizando el Athena tomando como base al inventario definido, los impactos que se evaluaron fueron: a) potencial de calentamiento global, b) potencial de acidificación, c) partículas suspendidas, d) potencial de eutrofización, e) potencial de destrucción de la capa de ozono, f) potencial de smog, g) energía primaria total h) energía renovable e i) consumo de combustible fósil.

3.2 Análisis del caso de estudio.

Este apartado se describió el edificio y sus componentes, así como el inventario de materiales

3.2.1 Descripción del edificio

De acuerdo a la metodología de ACV descrita anteriormente se evaluó un edificio construido en la ciudad de Mazatlán iniciando su construcción en enero del 2017 y terminado en septiembre 2023, se construyeron 27 niveles de edificación mixta considerando tres niveles de sótano para vehículos, un nivel de plaza comercial, nueve niveles de hotelería y 14 niveles para uso residencial, las dimensiones del edificio construido son 70.20m x 23.80 m en planta, sin embargo, el análisis descrito en esta investigación corresponden únicamente a 1000 m² de construcción, de estos 1000 m² analizados se incluyeron 10 departamentos residenciales, construidos con materiales y sistema constructivo tradicional es decir, utilizando materiales de concreto armado y cemento, entre otros, para el análisis.

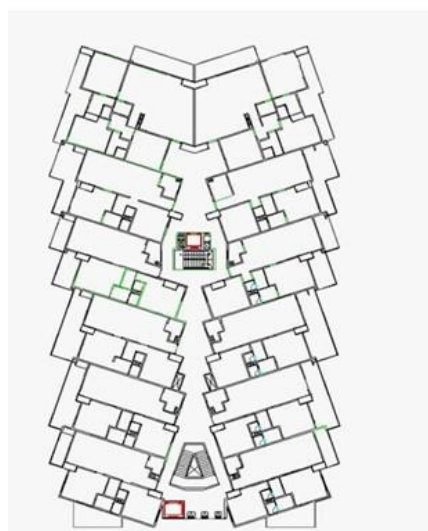


Figura 3.3 Planta arquitectónica y edificio construido

El alcance de la investigación contempla los materiales de construcción incluidos en la sub estructura y súper estructura, es decir, cimientos, columnas, vigas, losas, pisos, muros, recubrimientos en muros, recubrimientos en pisos, el uso de la madera para la construcción, el uso de la madera fina para puertas, el cristal para ventanas y el aluminio.

El inventario de materiales se construyó con visitas de campo, cuantificando la cantidad de material requerido por cada departamento en los 1000 m² de análisis, a su vez los materiales presentados en la tabla 3.6 se describen los materiales requeridos por unidad funcional, son la lista de materiales requeridos dentro de la etapa de construcción, el acero se cuantifico de acuerdo a la cantidad de acero correspondiente por m³ de concreto el cual equivale a 125 kg por m³ de concreto estructural.

Tabla 3.6 Lista de materiales que componen la unidad funcional descrita

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Concreto	1150	m ³
Acero corrugado	129.78	Ton
Block de cemento	41580	Pza
Yeso	28.6	Ton
Cemento	18	Ton
Hoja de yeso	980	m ²
Cerámica	40.4	Ton
Madera gruesa	75	Ton
Madera fina	2	Ton
Cristal	269	Kg
Aluminio	245	Kg
Poliestireno	824.46	Kg
Pintura	468	l

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos observados en campo

3.3 Aplicación del ACV mediante EI4B

El software contiene 16 regiones climáticas, para el caso de estudio que se presenta se seleccionó la región de los Ángeles California por tener ciertas características similares como formar parte del océano pacifico, además de ser la región más cercana al caso de estudio. Es importante destacar que la base de datos propia de EI4B contempla transporte, construcción en sitio, incluidos los residuos sólidos de construcción generados en el proceso de ejecución de obra, así como los procesos de demolición y sus etapas posteriores de acuerdo a lo que consideran las norma ISO 14040/14044 y la norma EN 15978.

La metodología utilizada para obtener los impactos ambientales asociados al caso de estudio se presenta en la figura 3.4

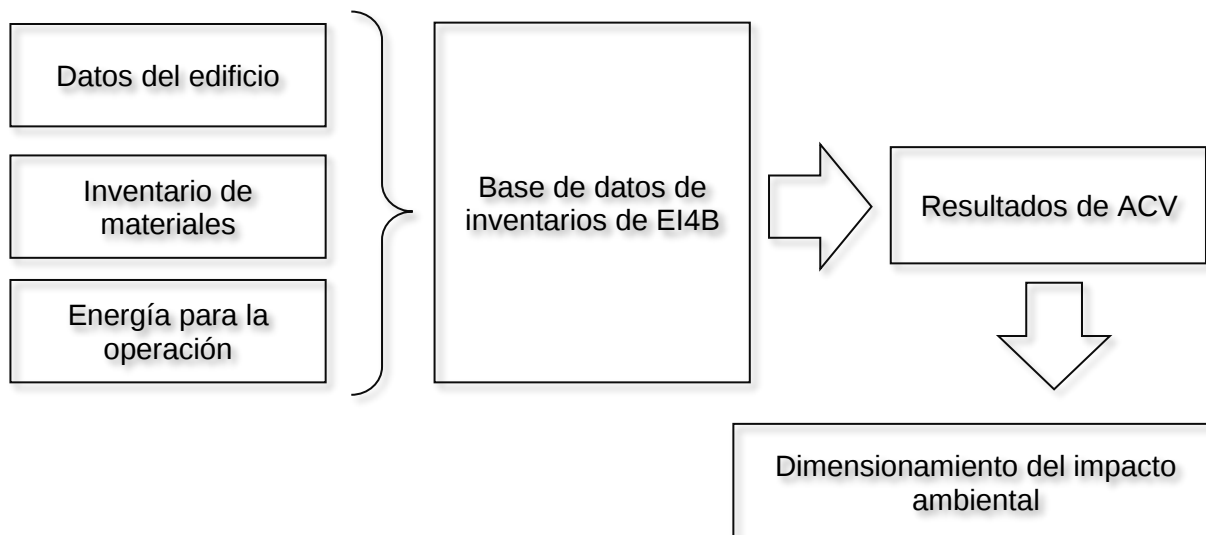


Figura 3.4 Diagrama de la metodología que implementa EI4B

Los procesos dentro del software siguen la normativa descrita anteriormente en el apartado de metodología del ACV haciendo uso de la normativa vigente a nivel internacional ISO14040/14044 y EN 15978. Es decir que en la etapa de producción (A1-A3) se integran los procesos de A1) extracción de materias primas, A) transporte y A3) producción o manufactura, en la etapa de construcción (A4-A5) se integran los procesos de A4) transporte y A5) construcción en sitio, en la etapa de uso (B1-B7) se integran los procesos de B1) uso del edificio, B2) mantenimiento, B3) reparación, B4) reemplazamiento de piezas, B5) renovación o remodelación, B6) consumo de energía, B7) consumo de agua, en la etapa de fin de vida del edificio (C1-C4) se consideran los procesos de C1) demolición, C2) transporte, C3) procesamiento de materiales y C4) disposición de materiales y durante la etapa más allá de la demolición del edificio en su cumplimiento de vida se considera la etapa D) dirigida a los beneficios y cargas ambientales evitadas durante el ciclo de vida del edificio, como el reúso, la recuperación, el reciclaje y la energía exportada. En esta última etapa se consideran los materiales como el acero que puede ser recuperado en su totalidad para hacer acero nuevo en las fábricas, así como el aluminio y la madera, existen coproductos como el cartón y plástico que no se están considerando en el ACV dentro de EI4B.

3.4 Resultados del ACV usando EI4B

De acuerdo al listado de materiales presentados en la tabla 3.1 que son requeridos en todo el proceso de construcción de la unidad funcional, hablando sobre los cimientos del edificio, para este punto el inventario de materiales requerido para los cimientos se dividió entre el total de m² de construcción de edificio y se obtuvo el total de material requerido para la unidad funcional. Por

otra parte, el consumo energético para un departamento tipo se considera según la agencia internacional de energía (International Energy Agency IEA, 2015) de 50 Kwh/m² en México, es decir de 50,000 Kwh/m², otros datos de entrada fueron los años de vida del edificio considerando 85 años para su demolición, la altura total del edificio es de 42 m y su área de análisis son 1000 m² de construcción.

3.4.1 Análisis de ciclo de vida por etapas escenario base

Etapa 1: de A1-A3; correspondiente a la etapa de extracción de material y fabricación, representa los impactos ambientales (IA) generados de las fábricas de materiales, que incluyen la minería de recursos primarios, el transporte de materia prima a la fábrica, y fabricación de materias primas a productos considerando el insumo de energía eléctrica, combustible fósil, energías renovables si es el caso, aceites. La materia prima es la piedra caliza para la fabricación de cemento, los agregados pétreos (arena y grava) para la fabricación del concreto y derivados, el acero para varillas corrugadas, generalmente existe un residuo de material en las etapas de extracción y fabricación.

Etapa 2: Etapa de construcción A4-A5; en esta etapa los IA generados convergen en los transportes de las fábricas de materiales a la puerta del sitio de construcción, el uso de la energía en la construcción, los RCD y sus respectivos transportes a sitios de disposición final, para cada una de las etapas de la construcción (cimientos, columnas, vigas, losas, pisos, muros, recubrimientos en pisos y muros, instalación de cristal en ventanas y puertas de madera sólida).

Etapa 3: Uso B1-B7; En esta etapa se evalúan los IA generados por tareas de mantenimiento, reparación, actividades de reemplazo para que la funcionalidad del edificio no se vea afectada por el tiempo, también considera el consumo de la energía requerida para la climatización de los espacios, calefacción y enfriamiento, y el consumo de los equipos requeridos en la residencia, el consumo de agua caliente etc, también considera el consumo de agua potable para el uso doméstico y jardinería.

Etapa 4: Fin de vida del edificio C1-C4; Durante esta etapa se deben considerar el equipo y la maquinaria requerida alimentados por diésel, es decir los IA se caracterizan por los consumos de diésel, el impacto por transporte de los RCD y la segregación de los mismos para su posterior tratamiento, aquellos que no reciben tratamiento serán transportados a sitios de disposición final, o se usarán para rellenos sanitarios. Para esta etapa el software dentro de su base de datos determina el porcentaje de materiales y su clasificación para reutilización, reciclaje, vertedero e incineración.

Etapa 5: Cargas evitadas al final de vida del edificio D; la etapa define los impactos ambientales evitados por la circularidad que representa el integrar estos materiales como el acero, el aluminio,

la madera, el cartón, la cerámica a un nuevo ciclo de vida que le permitirá recuperar energía incorporada en sí mismos, sin embargo, conlleva la etapa de tratamiento que la base de datos del software establece para la región elegida.

En la tabla 3.7 y 3.8 se presentan los resultados relacionados a las etapas del proceso de ACV completo del edificio considerando desde la A-D para cada una de las categorías de impacto y los impactos ambientales.

Tabla 3.7 Impactos ambientales por etapa analizada del ACV del edificio

	Categorías de impacto	Calentamiento global	Acidificación	Emisión de partículas de polvo	Eutrofización	Destrucción de capa de ozono	Potencial de smog	Energía primaria total	Energía no renovable	Consumo de combustible fósil
	Unit	kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PM _{2.5} eq	kg N eq	kg CFC-11 eq	kg O ₃ eq	MJ	MJ	MJ
PRODUCCIÓN (A1 to A3)	Producción (A1 to A3)	9.00E+05	3.28E+03	1.13E+03	7.39E+02	1.79E-02	4.74E+04	8.70E+06	8.47E+06	6.91E+06
	Transporte	2.50E+03	2.42E+01	1.33E+00	1.50E+00	8.76E-08	7.63E+02	3.65E+04	3.64E+04	3.64E+04
	Total	9.03E+05	3.30E+03	1.13E+03	7.41E+02	1.79E-02	4.81E+04	8.73E+06	8.51E+06	6.95E+06
PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN (A4 & A5)	Procesos de construcción (A4 & A5)	4.58E+04	3.70E+02	3.38E+01	4.63E+01	8.66E-04	1.03E+04	4.75E+05	4.63E+05	4.35E+05
	Transporte	7.51E+04	8.05E+02	4.03E+01	4.99E+01	2.79E-06	2.56E+04	1.08E+06	1.08E+06	1.08E+06
	Total	1.21E+05	1.18E+03	7.41E+01	9.62E+01	8.69E-04	3.60E+04	1.56E+06	1.55E+06	1.52E+06
USO (B2, B4 & B6)	Fabricación de reemplazamiento	1.11E+05	8.31E+02	1.45E+02	7.19E+01	2.47E-03	1.25E+04	2.17E+06	2.12E+06	1.88E+06
	Transporte de reemplazamiento	1.06E+04	1.23E+02	5.80E+00	7.61E+00	4.19E-07	3.93E+03	1.53E+05	1.53E+05	1.53E+05
	Total, de energía operacional	2.12E+06	4.61E+03	6.09E+03	1.88E+03	1.61E-01	6.58E+04	3.93E+07	3.23E+07	2.73E+07
	Total	2.24E+06	5.56E+03	6.24E+03	1.96E+03	1.64E-01	8.22E+04	4.16E+07	3.46E+07	2.94E+07
FIN DE VIDA (C1 to C4)	Demolición y procesos de residuos	3.23E+04	4.45E+02	2.24E+01	2.77E+01	1.41E-06	1.47E+04	4.80E+05	4.80E+05	4.79E+05
	Transporte	1.35E+04	1.30E+02	7.18E+00	8.06E+00	4.71E-07	4.09E+03	1.97E+05	1.97E+05	1.96E+05
	Total	4.58E+04	5.74E+02	2.96E+01	3.58E+01	1.88E-06	1.88E+04	6.77E+05	6.77E+05	6.76E+05
MAS ALLA DEL FIN DE VIDA (D)	BBL Material	-4.01E+04	-7.66E+01	-3.36E+01	-3.94E+00	0.00E+00	-7.74E+02	-1.53E+05	-1.53E+05	-3.08E+05
	BBL Transporte	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Total	-4.01E+04	-7.66E+01	-3.36E+01	-3.94E+00	0.00E+00	-7.74E+02	-1.53E+05	-1.53E+05	-3.08E+05
EFFECTOS TOTALES	A to C	3.31E+06	1.06E+04	7.48E+03	2.83E+03	1.83E-01	1.85E+05	5.26E+07	4.54E+07	3.85E+07
	A to D	3.27E+06	1.05E+04	7.44E+03	2.82E+03	1.83E-01	1.84E+05	5.24E+07	4.52E+07	3.82E+07

Elaboración propia a partir de resultados de Athena

Tabla 3.8 Impactos ambientales por elementos en la etapa de construcción

Valores de ACV	Calentamiento global	Acidificación	Emisión de partículas de polvo	Eutrofización	Destrucción de capa de ozono	Potencial de smog	Energía primaria total	Energía no renovable	Consumo de combustible fósil
Unidad	kg CO ₂ eq	kg SO ₂ eq	kg PM2.5 eq	kg N eq	kg CFC-11 eq	kg O ₃ eq	MJ	MJ	MJ
Cimientos	4.11E+05	1.57E+03	5.21E+02	3.67E+02	7.15E-03	3.32E+04	3.51E+06	3.43E+06	2.98E+06
Muros	2.68E+05	1.82E+03	2.95E+02	1.37E+02	4.25E-03	3.30E+04	4.49E+06	4.38E+06	3.31E+06
Vigas y Columnas	1.17E+05	5.33E+02	1.28E+02	9.70E+01	1.80E-03	1.08E+04	1.15E+06	1.12E+06	9.88E+05
Losas	2.28E+05	1.08E+03	2.40E+02	2.34E+02	6.25E-03	2.16E+04	2.48E+06	2.42E+06	2.19E+06
Pisos	1.28E+05	9.29E+02	1.67E+02	1.14E+02	1.81E-03	2.00E+04	1.52E+06	1.50E+06	1.41E+06
Extra materiales	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	1.15E+06	5.93E+03	1.35E+03	9.48E+02	2.13E-02	1.19E+05	1.31E+07	1.29E+07	1.09E+07

Elaboración propia a partir de resultados de Athena

4. Resultados y discusión

4.1 Análisis del escenario base

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a través del Estimador de impactos de Athena iniciando por los impactos asociados al escenario base seguido de los escenarios extendiendo la vida útil del edificio (85, 100 y 150 años) analizando desde (A1-D) así mismo el escenario de uso de energía renovable utilizada en la etapa de uso de (B2-B6) de acuerdo al porcentaje de uso (100, 50 y 0 %), consecutivamente se presentan los resultados referente al escenario de materiales de envolvente del escenario base en el que se analizaron las etapas de (A1-D) para comparar el escenario base construido con block de concreto, con insulpanel en sustituto al block de concreto y muros de vidrio en fachadas únicamente usando block de concreto al interior.

En la figura 4.1 se presenta el potencial de destrucción de la capa de ozono CFC-11 eq y el potencial de emisiones de smog O₃ eq son los dos impactos de mayor carga ambiental y en mayor medida en los procesos de manufactura y en la etapa de fin de vida por la demolición disposición y procesamiento de residuos, también se puede observar que más allá de la vida útil se evitan las cargas ambientales al evitar el uso de energía fósil con la recuperación de la energía integrada a los materiales de construcción de los procesos previamente relacionados, siendo importante el reciclaje de materiales para recuperar energía incorporada.

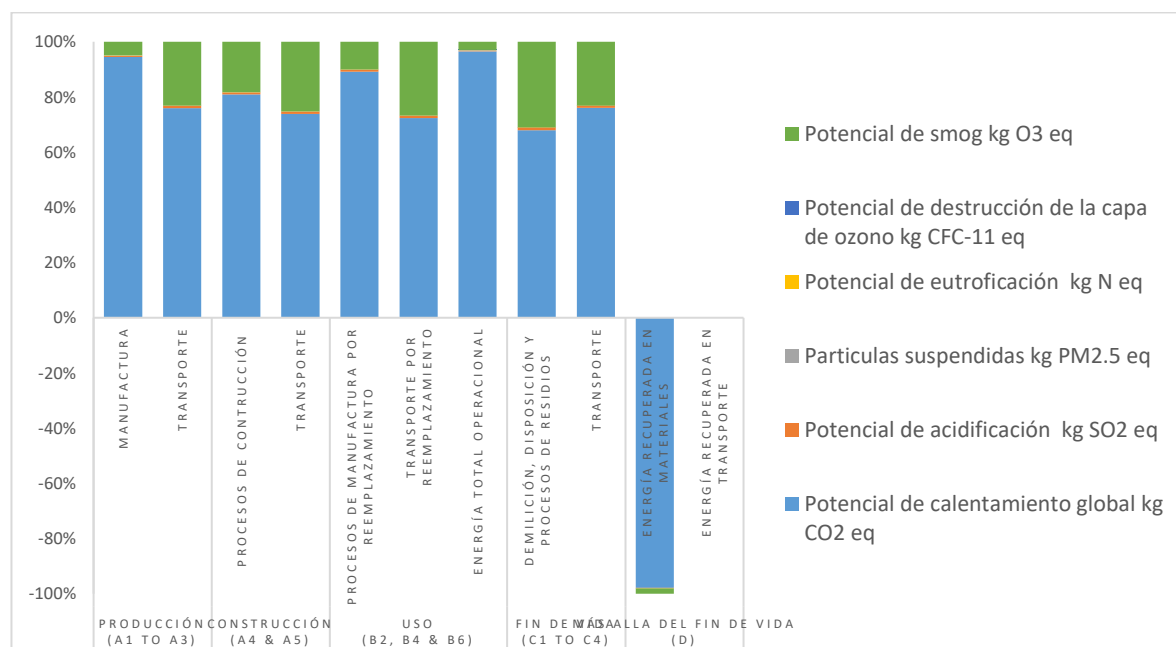


Figura 4.1 Porcentajes de emisiones potenciales ambientales de la construcción: escenario base

En las figuras 4.2 y 4.3, se presentan los resultados del potencial de calentamiento global, los cuales muestran que el 35% de su contribución está relacionado con los procesos de construcción, estos tienen una duración de tres años, considerando las etapas desde (A1-A5) mientras que la carga del 65% está asociada a una duración de 85 años de vida del edificio y consta únicamente de la etapa de uso y operaciones del edificio desde (B2-B6) esto se traduce que por año de construcción se emite el 11.66 % del potencial de calentamiento global mientras que la etapa de uso contribuye por año 0.76% de este gas CO₂ eq.



Figura 4.2 Potencial de calentamiento global en Kg CO₂ eq en escenario base

Con relación al consumo de energía, para los procesos de construcción, y procesos de uso, se realiza el mismo análisis, que se presentó para el calentamiento global, en la figura 4.3 se observa que la etapa de construcción, por año, equivale a 7.6% del consumo total de energía mientras que la etapa de uso, por año, requiere 0.88% de energía para funcionar el edificio en su escenario base. Por ello al relacionar el consumo de energía directamente con el potencial de calentamiento global muestra la importancia de reducir energía en las etapas (A1-B5), a través del reciclaje.

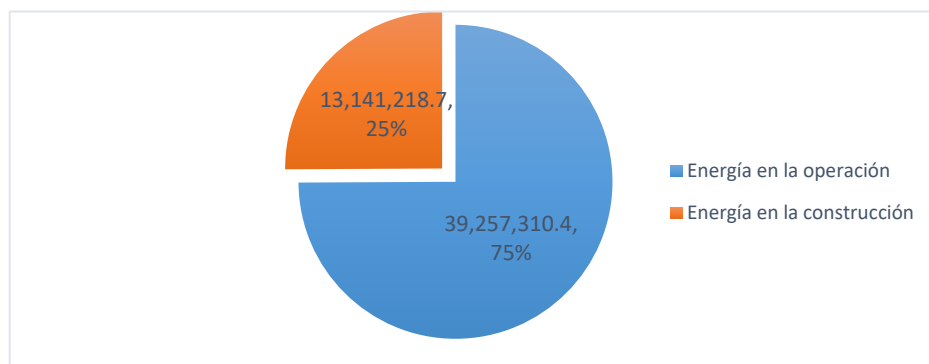


Figura 4.3 Consumo de energía en MJ en escenario base

Sobre la relación del consumo de energía fósil utilizada en la etapa de construcción por elemento constructivo, los resultados muestran que los procesos de cimientos y muros, que son de materiales de concreto, requieren mayor consumo de energía seguido de las losas y firmes. Como se muestran en las figuras de la 4.4 a la 4.7

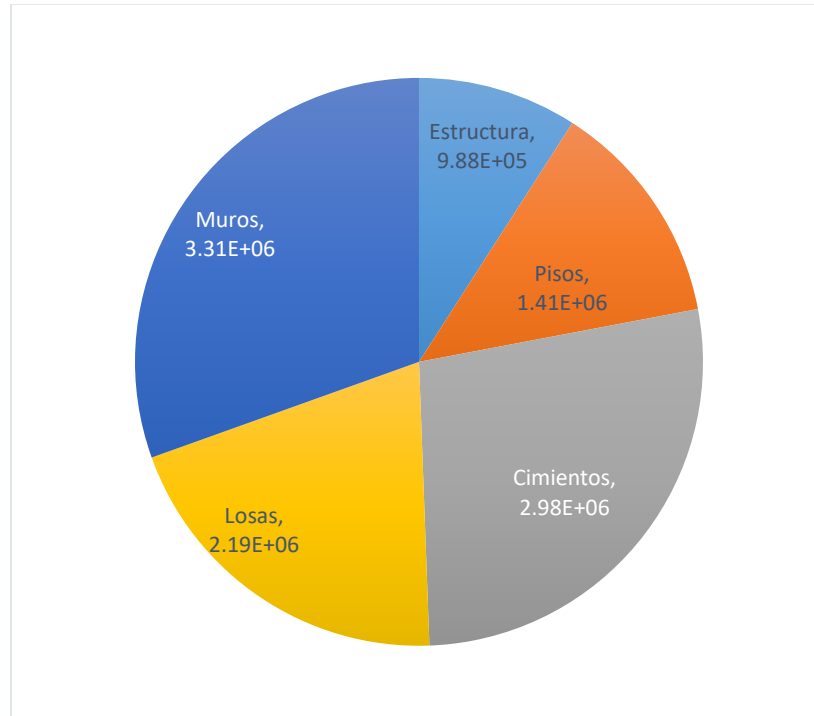


Figura 4.4 Consumo de energía fósil por etapa de construcción, escenario base

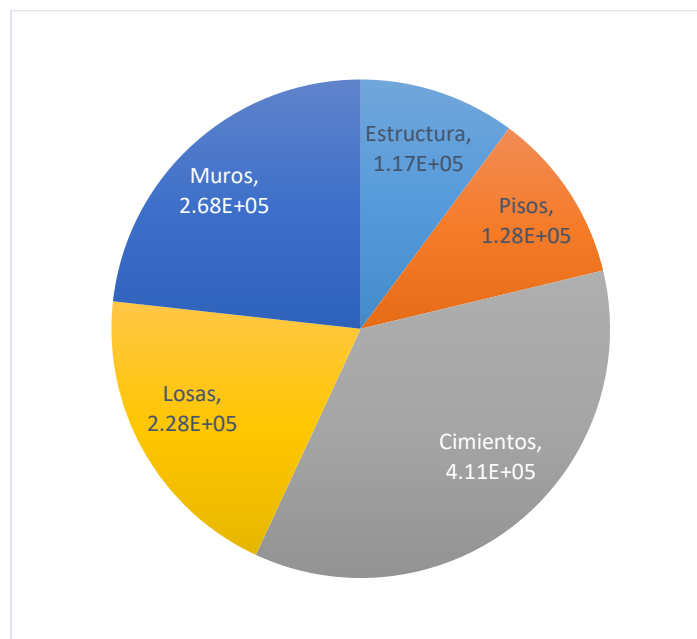


Figura 4.5 Emisiones de potencial de calentamiento global por sistema constructivo

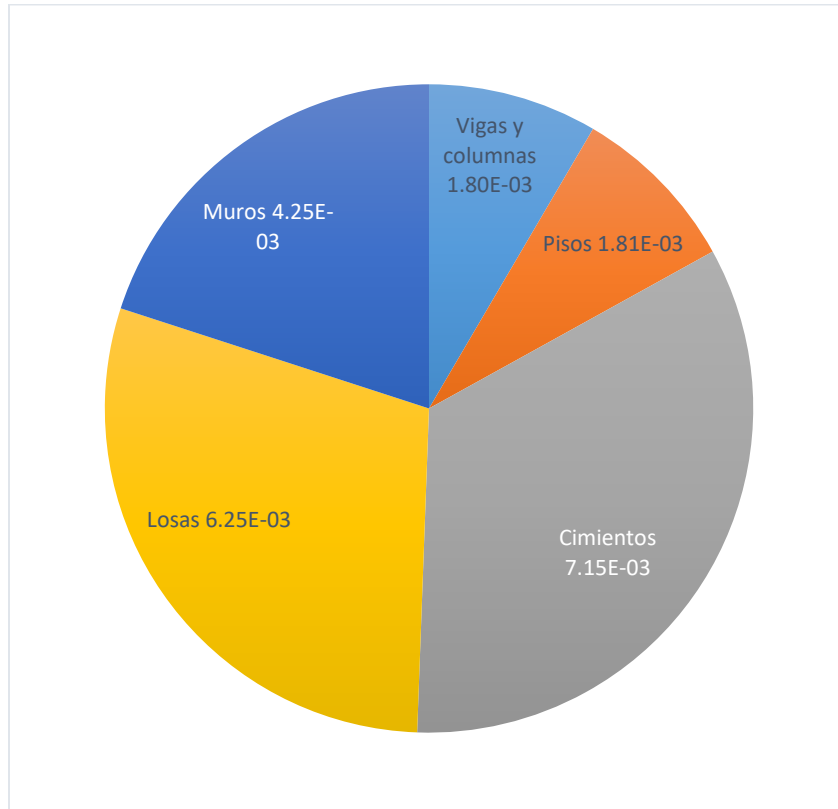


Figura 4.6 Potencial de destrucción de la capa de ozono e kg CFC-11 eq. Escenario base

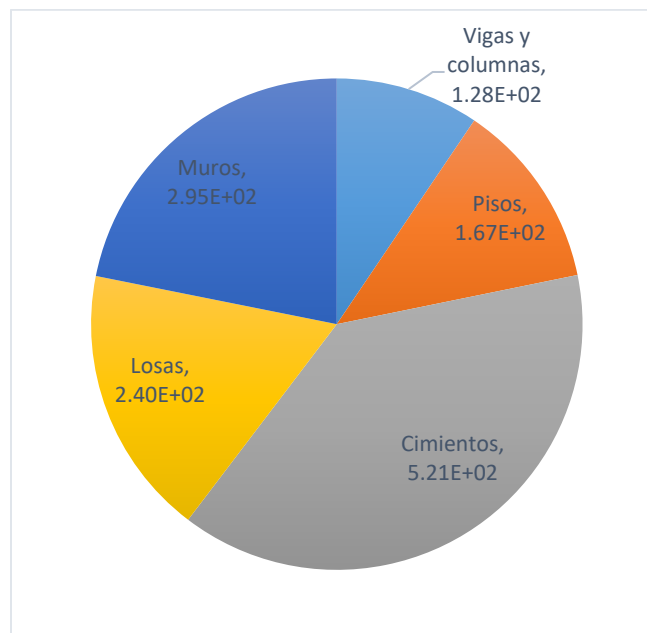


Figura 4.7 Total de emisiones por elemento constructivo del escenario base

Los tipos de energía y combustibles utilizados en los procesos del ciclo de vida desde (A1-D) en la etapa D, más allá del fin de vida la energía incorporada a los materiales de construcción y derivados está relacionada con la energía de combustibles fósiles que se atribuyen a transporte, energía primaria no renovable y la energía generada a través del carbón, siendo los combustibles fósiles, la energía primaria no renovable, energía hidráulica y el diésel las formas de energía de mayor uso en el proceso de ciclo de vida de una edificación (Figura 4.8).

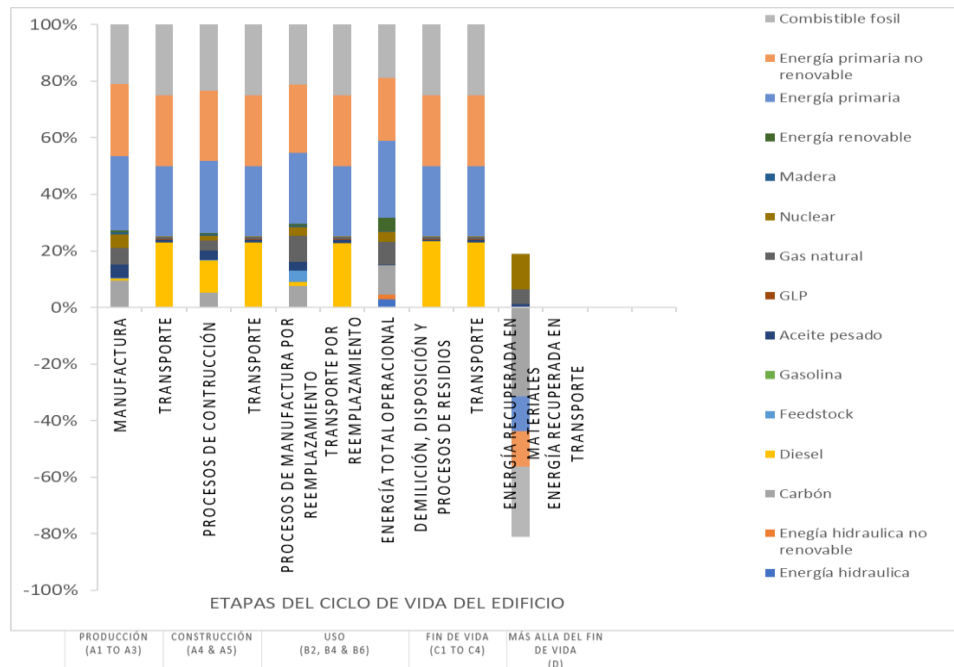
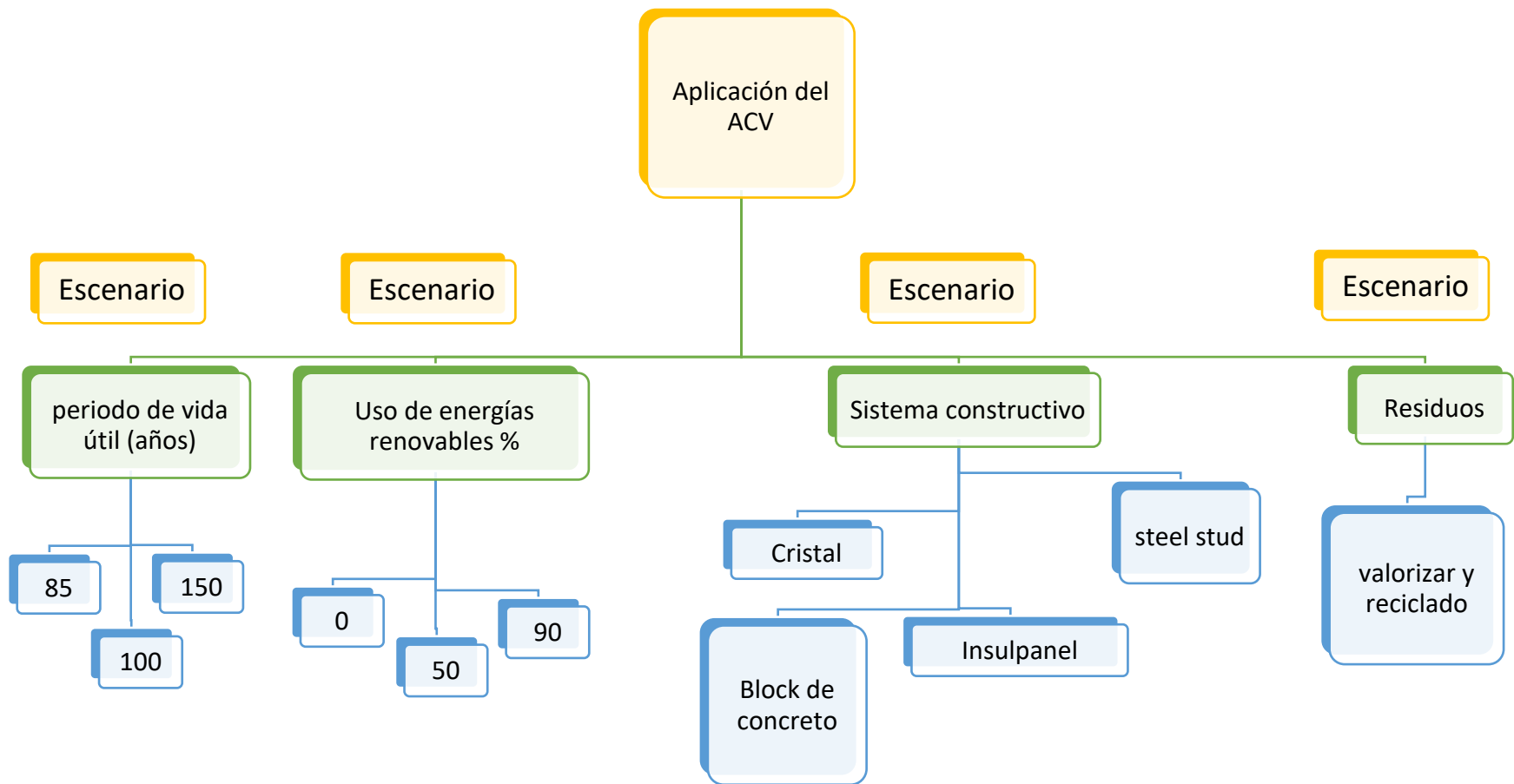


Figura 4.8 Consumo de tipos de energías por etapas de ciclo de vida

El análisis del escenario base supone realizar algunas mejoras a evaluar como es el extender la vida útil del edificio y analizar los efectos ambientales que esto conlleva, así pues, se presenta el ACV para el edificio comparando tiempo de vida útil efectiva de 85 años, 100 años y 150 años, que se designó como escenario 1, por otra parte, se presentan los escenarios en función de la energía limpia considerando una eficiencia de 90%, 50% y 0% usando alternativamente energía limpia, en el análisis no se considera realizar inventarios ni análisis de la infraestructura requerida la instalación de la energía fue el escenario 2. El escenario 3 evalúa lo correspondiente a los materiales y sistemas constructivos que conforman la envolvente del edificio, y se analizaron alternativas que suponen mejoras en los procesos, como reducción de residuos, aislamiento del edificio para mayor confort térmico, tiempos de ejecución menor, estructura más ligera, sin embargo todas estas condiciones evaluaron únicamente el compromiso ambiental que generan de acuerdo al interés de las categorías de impacto y se analizaron los sistemas constructivos que usan block de concreto, fachadas de cristal, panel del yeso, y panel de lámina galvanizada pre

pintada con placa de poliuretano hasta 12 cm de espesor. Por último, el escenario 4 se evaluó el ACV para los residuos generados en obra durante la construcción del caso base donde se realizó el inventario de materiales residuales equivalentes del 3 al 5% de la construcción en correlación a la unidad funcional de 1000 m² de construcción, y se supone realizar valorización de residuos a fin de darles un nuevo uso, a aceros, madera, cristal, cerámicos, plásticos, cartón, aluminio, en el mismo sitio de transferencia, como se muestra en la figura 4.9.



Nota: Esta figura es complemento de la figura 3.1

Figura 4.9 Aplicación del ACV por escenarios planteados

4.2 Evaluación del Escenario 1

En este escenario se evaluó el edificio considerando como unidad funcional los 1000 m² de construcción mismos que fueron sometidos a diferentes periodos de tiempo de vida útil considerando el mismo sistema constructivo y consumo de energía utilizados para la construcción del escenario base, se eligieron estas alternativas derivado del método que se presenta en la norma ISO 15686(ISO, 2017) que describe los factores esenciales y da indicaciones de cómo establecer el periodo de vida útil de referencia en cada uno de los factores, el método consiste en los siguientes factores (Hernández-Moreno et al., 2015).

Factor A. Calidad de diseño arquitectónico y constructivo, incluye principalmente la calidad de los trabajos a nivel de proyecto, esto depende en gran medida del desarrollador de proyectos.

Factor B. Calidad de los materiales de construcción, la calidad de los materiales depende de los procesos de fabricación y manufactura y si cumplen con las normas técnicas para cubrir las necesidades para las que fueron diseñados.

Factor C. Tipo de medio ambiente interior del edificio, se refiere a las condiciones que influyen en el deterioro de los materiales y del edificio en general, como la humedad, temperatura, ventilación, iluminación.

Factor D. Tipo de medio ambiente exterior del lugar, estos se refieren a las condiciones climáticas propias del lugar como la radiación solar, la lluvia, Hongos del ambiente, viento, humedad, todas las condiciones que influyen en el deterioro del edificio y sus componentes.

Factor E: Calidad de mano de obra, es de gran importancia que el personal esté capacitado para realizar las actividades de construcción e instalaciones del edificio, que conozcan los procesos, los materiales, las mezclas, los componentes, las sujeciones y uniones.

Factor F. El uso que se le dará al edificio, estas condiciones de uso dependerán si el edificio es residencial, vacacional, de servicios, oficina, educativo, administrativo etc., esto se debe considerar no solamente en el diseño sino también para cuando este pase a fin de vida.

Factor G. Tipo y grado de mantenimiento, tanto la calidad como el nivel de los trabajos de mantenimiento, reemplazamiento, reparaciones y renovaciones permitirán alcanzar o no que el edificio logre su vida útil estimada, incluso llevar una vida útil más allá de lo estimado.

Tabla 4.1 Factores de medición de la edad de un edificio

CALIFICACIÓN	0.8	1.0	1.2
Factores	Información incompleta	Cumple con los aspectos mínimos	Muy alto nivel de información
A) CALIDAD DEL DISEÑO ARQUITECTÓNICO			
Licencia de construcción	No cuenta	Sin acceso al documento	Si cuenta
B) CALIDAD DE LOS MATERIALES Y COMPONENTES DE CONSTRUCCIÓN			
Función física/mecánica	30% cumple	50% cumple	100%
Función constructiva	No cumple	Cumple, pero sin estudios	Cumple con estudios previos
Función económica	Dificultades	Disponibilidad de materia prima	Fácil accesibilidad y material disponible
C) EL MEDIO AMBIENTE DEL INTERIOR DEL EDIFICIO			
Ventilación	Sin un sistema	Diseño bioclimático	Sistemas provistos
Mantenimiento de redes	Sin manto	Manttinimiento Periódicos	Mantenimiento Predictivos y preventivos
D) MEDIO AMBIENTE EXTERNO DEL EDIFICIO, CLIMA Y CONTAMINACIÓN URBANA			
Clima	No adecuada para desastres naturales	Estructura adecuada para el clima	Diseño y estructura adecuado
Topografía	No soporta	Diseño y construcción acorde a la topografía	Estudios y diseños en base a la topografía
Amenazas y riesgos	Inundaciones	Buen nivel friático	Soporta cualquier riesgo
E) CALIDAD Y NIVEL DE MANO DE OBRA			
Acabados	Deficiencia del 70%	Eficiencia del 50%	Óptimos 100%
Patologías	Graves	Irrelevantes	No presenta
F) USO DEL EDIFICIO CON BASE EN MANUALES Y ESPECIFICACIONES REALIZADAS POR DISEÑADORES Y CONSTRUCTORES			
Uso / impacto	Cambio de uso/modificado	Cambio de uso sin modificaciones	Uso esperado de acuerdo al diseño y construcción
G) GRADO O NIVEL DE MANTENIMIENTO DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES ASENTADAS EN MANUALES			
Manual de mantenimiento	No lo aplican	No cumple en la totalidad	Mantenimiento riguroso
Sin manual de mantenimiento	No hay información	Mantenimiento no periódico	Mantenimiento periódico

Fuente: Modificado de (Anaya Estevez et al., 2018)

De acuerdo a estos factores establecidos para el escenario base y la fórmula para determinar el valor de vida útil estimada que se describe en la ecuación 2 (Anaya Estevez et al., 2018).

$$VUE = VUD \times (A) \times (B) \times (C) \times (D) \times (E) \times (F) \times (G)$$

Ecuación 2: Cálculo de la vida útil estimada de un edificio

Donde:

VUE= Vida útil estimada

VUD= Vida útil de diseño

A = Factor de Calidad de diseño arquitectónico y constructivo.

B = Factor de Calidad de los materiales de construcción.

C = Factor Tipo de medio ambiente interior del edificio

D = Factor Tipo de medio ambiente exterior del lugar

E = Factor Calidad de la mano de obra

F = Factor Uso de edificio

G = Factor Grado o nivel de mantenimiento

Considerando una vida útil de diseño de 85 años y que cumple con las especificaciones mínimas en diseño y construcción, materiales de calidad, mantenimientos periódicos, estructura adecuada para el clima, mano de obra óptimo, mantenimientos no periódicos tenemos que, $VUE = 85 \times (1 \times 1.2) = 102$ años o 100 años

Mientras que otro escenario es que cuente con trabajos proactivos y preventivos en mantenimientos a lo largo de la vida útil, considerando que

$VUE = 85 \times (1.2 \times 1.2 \times 1.2 \times 1) = 146$ años o 150 años

Este escenario evaluado y comparando los resultados obtenidos, el porcentaje de emisiones fue del 1% de emisiones de potencial de calentamiento global medido en emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del edificio desde la (A1-D) comparando el periodo de 85 años y 100, mientras que para la comparación del periodo de 85 años contra 150 tiene un incremento de 3% del total de las emisiones de CO₂, es decir que durante los primeros 15 años el porcentaje anual equivale al 0.06% mientras que en los siguientes 50 años el incremento mensual es de 0.04%, con base a estos resultados se afirma que las edificaciones deben cumplir con un mayor tiempo de vida para reducir las emisiones de CO₂.

Por otra parte, la relación al porcentaje de la categoría de impacto de las emisiones de potencial de smog, este disminuye a través del tiempo, se reduce 1% entre el año 85 y el año 150. (figuras 4.10 a la 4.13).

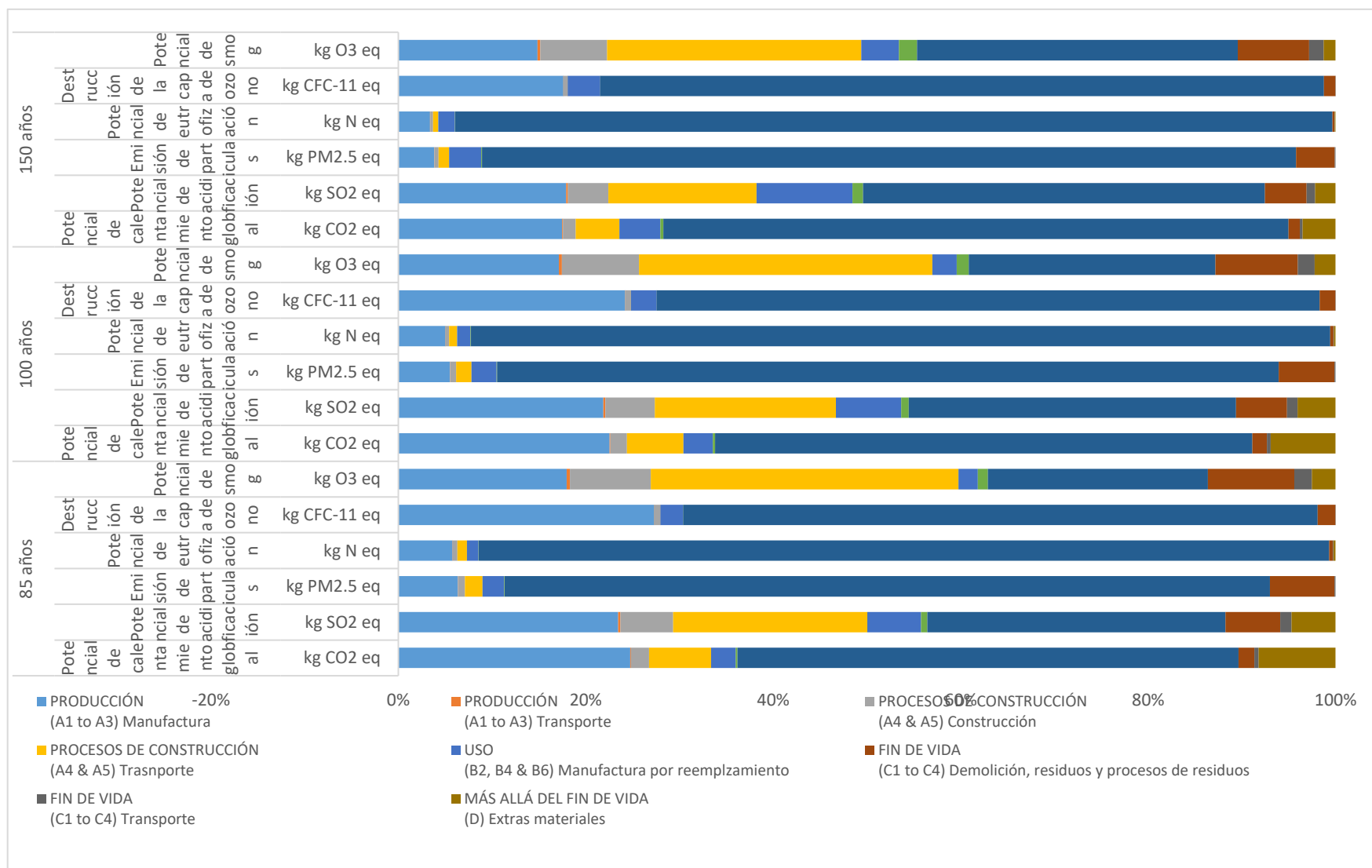


Figura 4.10 Emisiones potenciales en los diferentes periodos del ciclo de vida

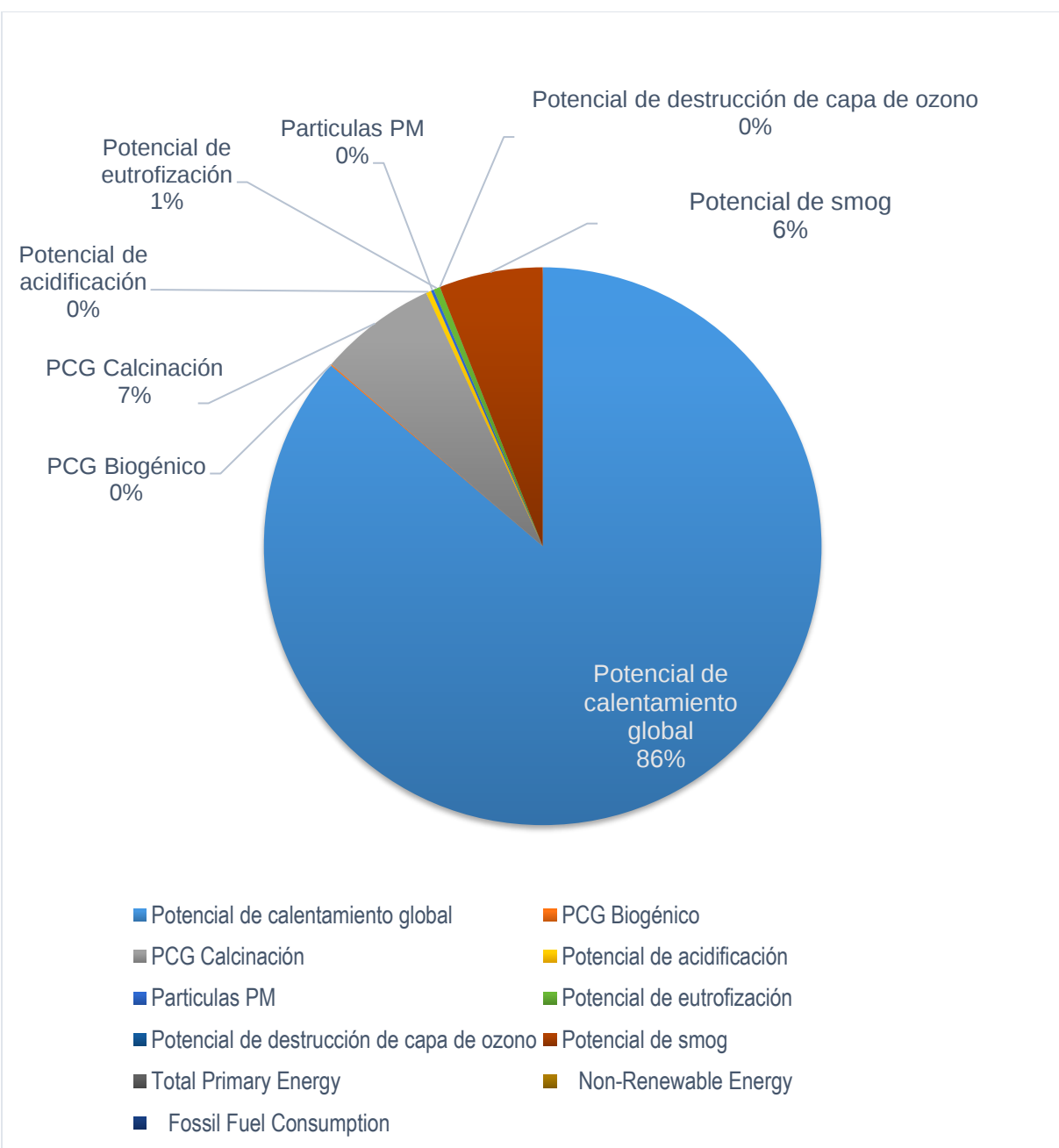


Figura 4.11 Emisiones potenciales a los 85 años

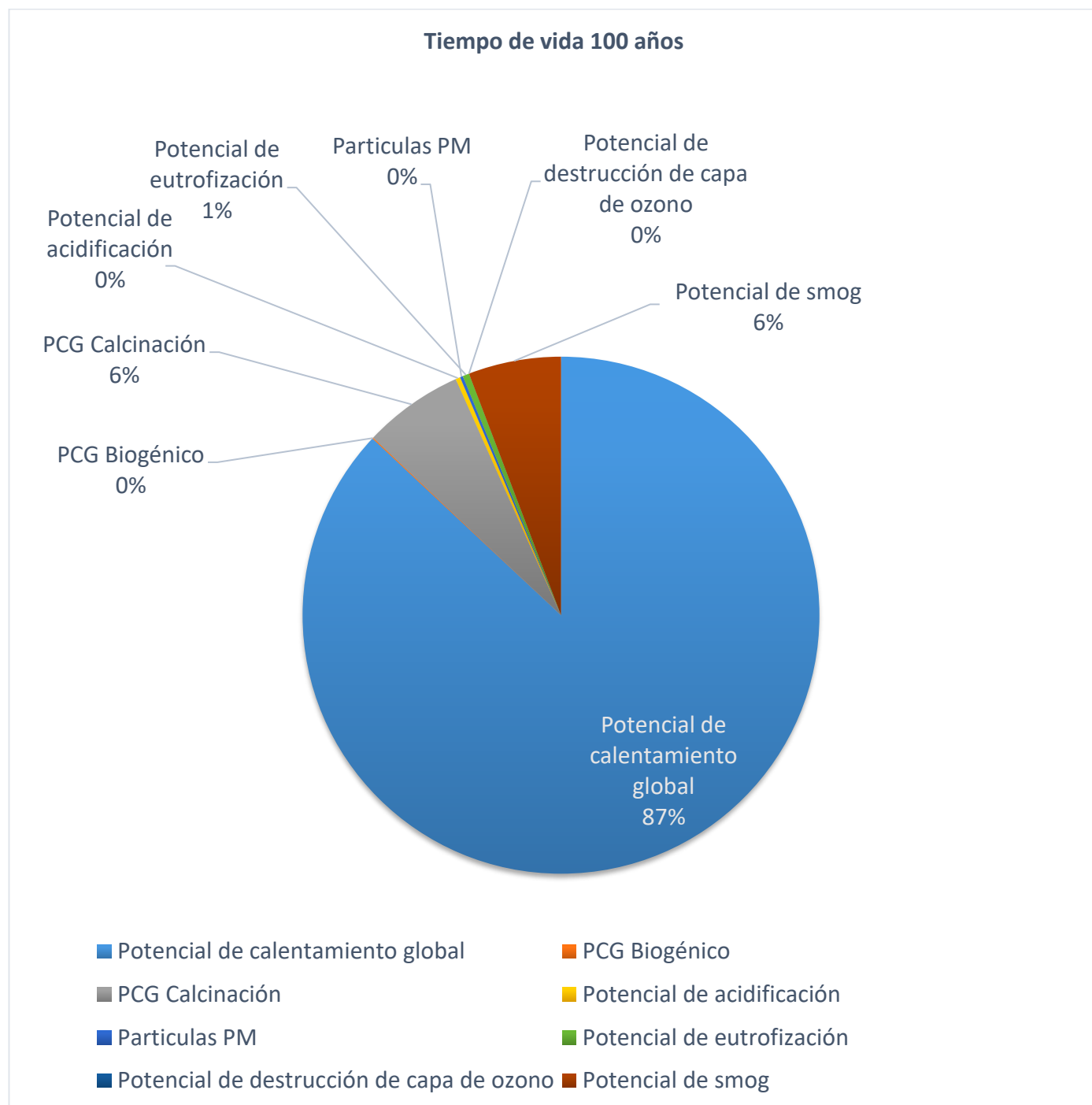


Figura 4.12 Emisiones potenciales a los 100 años

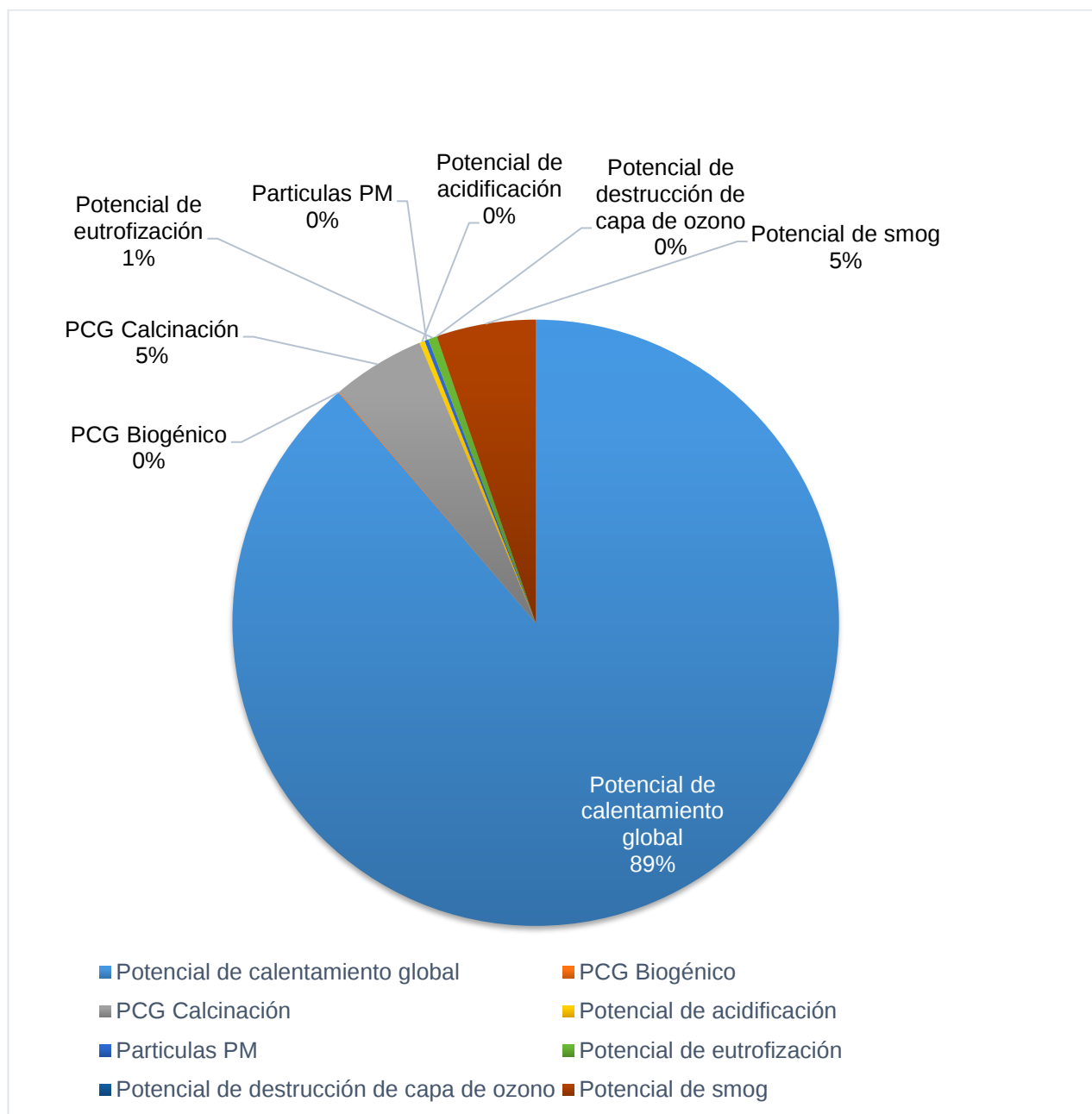


Figura 4.13 Emisiones potenciales a los 150 años

4.3 Evaluación del escenario 2

En este escenario se evaluó el consumo de energía renovable y no renovable y la relación con las categorías de impacto, como se muestra en la figura 4.14, la sustitución de un 90 % de energía renovable por la energía no renovable disminuye 1731.8 ton de CO₂ al reducir el consumo, mientras que el 50% de consumo de energía tiene un impacto positivo de 830 ton de CO₂ evitadas a la atmosfera.

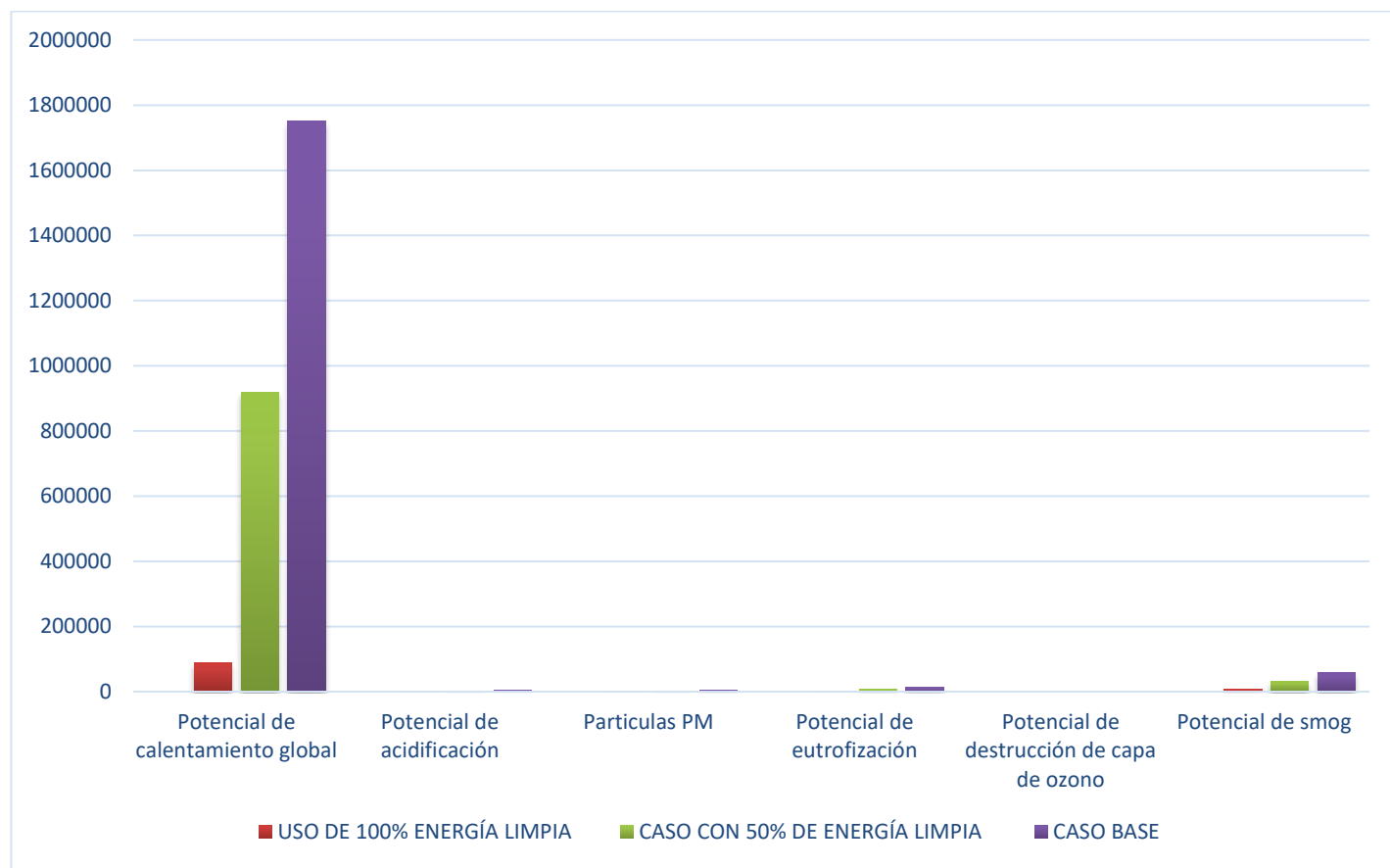


Figura 4.14 Evaluación del consumo de energía en el escenario 2

Así pues, las emisiones en referencia con el potencial de smog KgO_3eq , el uso de energía renovable disminuye 24.70 ton usando el 50% de energía renovable mientras que usar el 90% representa una disminución de 50.15 ton equivalentes a una disminución de smog en la atmosfera de en un 67 % y un 93% respectivamente como se muestran en la fig. 4.15 y fig. 4.16

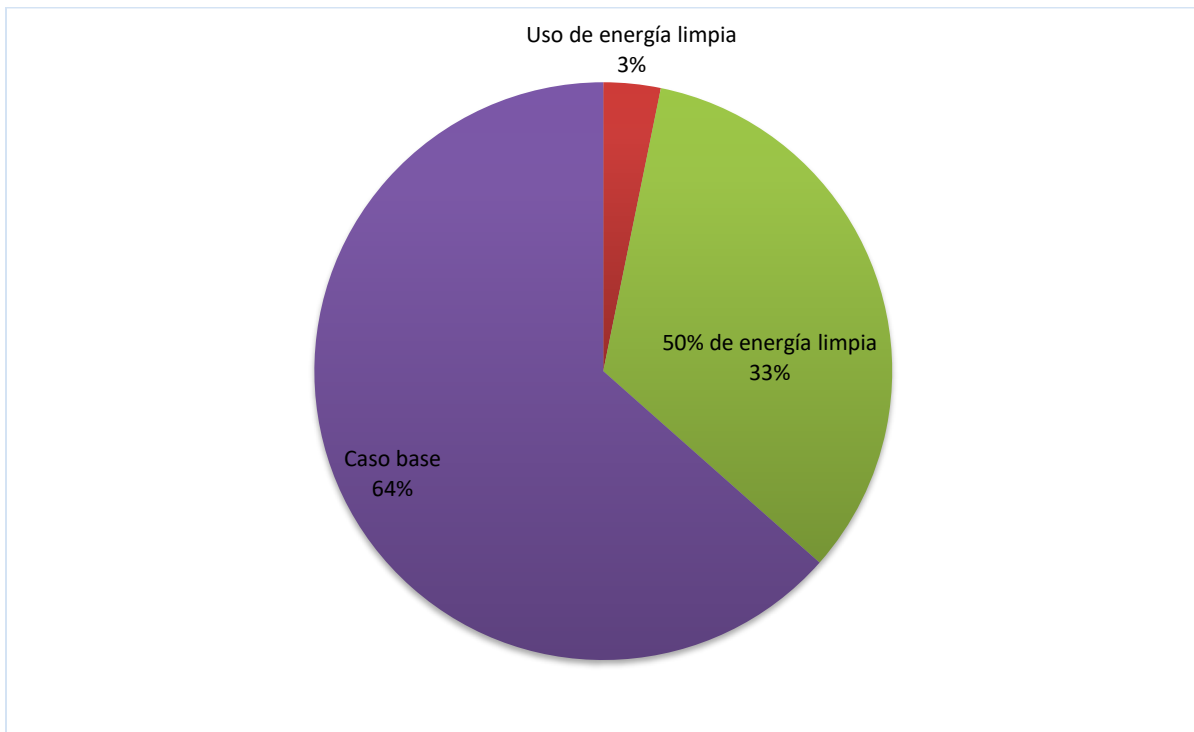


Figura 4.15 Emisiones de potencial de calentamiento global CO₂ eq

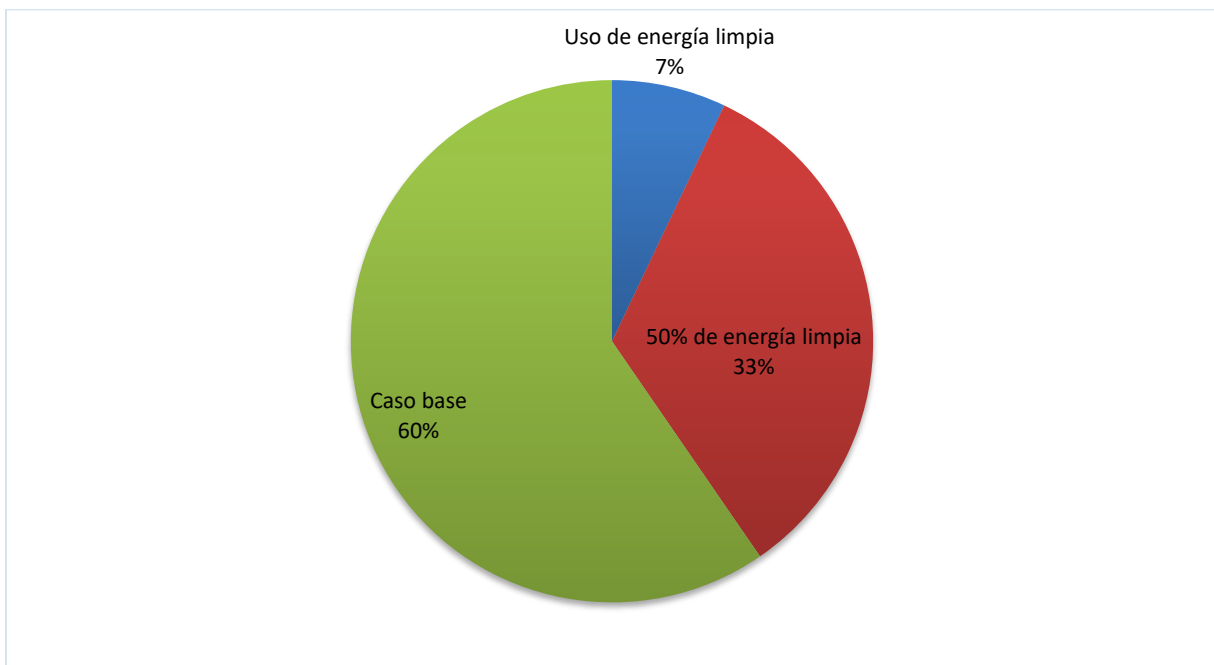


Figura 4.16 Potencial de smog Kg O₃ eq

4.4 Evaluación del escenario 3.

Para este escenario se eligieron sistemas constructivos que pudieran simularse en el software de Athena y poder comparar contra el caso base si tenían beneficios ambientales en relación con el sistema constructivo de muros de block de concreto, los sistemas constructivos que se eligieron están en relación a los muros de envolvente y divisorios, considerando que el caso base las alternativas son:

- Caso base: block de concreto en fachadas e interiores
- Propuesta 1: fachadas de cristal con muros interiores de block de concreto
- Propuesta 2: Insulpanel de 12cm de espesor en muros exteriores e interiores
- Propuesta 3: Muros interiores y exteriores en construcción de Steel stud

Para este caso no se consideran las propiedades térmicas de los materiales como reducir energía operacional, únicamente se evalúa el ciclo de vida desde A1 a A5 Y de C1 a D.

Sin embargo, se considera utilizar la misma estructura a base de vigas, columnas y losas de concreto armado

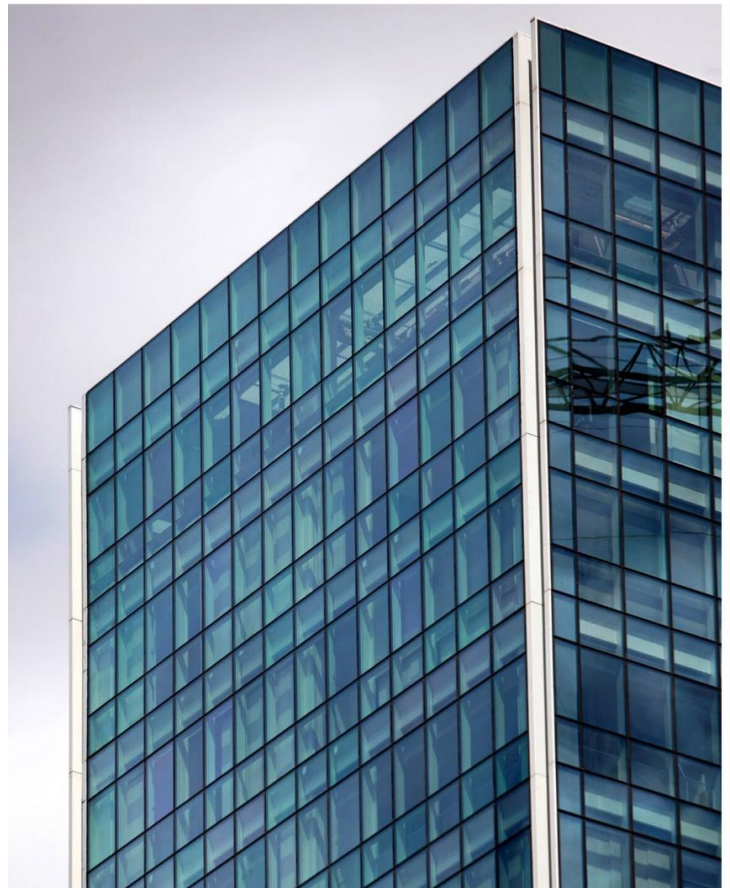




Figura 4.17 Sistemas constructivos propuestos

De acuerdo a la figura 4.18 de las emisiones potenciales por sistema constructivo los sistemas de block de concreto y construcción con muros de cristal poseen características similares en cuanto a las emisiones de potenciales, sin embargo el block de concreto favorece en las cargas evitadas el potencial de calentamiento global biogénico por encima de las 2.4 ton este dióxido de carbono resultante de la descomposición, digestión o combustión de la biomasa o de productos derivados de la biomasa.

Por otra parte, se analizaron las emisiones potenciales por sistema constructivo y por etapa de ciclo de vida ver fig. 4.18, en la cual la etapa de uso significativamente con un aproximado de 3110 toneladas de potencial de calentamiento global producidas a través de las etapas de ciclo de vida durante los 85 años de diseño, es decir $3.11\text{kg de CO}_2/\text{m}^2$ siendo la de mayor aporte el consumo de energía ver fig. 4.19, esta cantidad contribuye anualmente el sistema de block de concreto con las características constructivas del edificio en cuestión, mientras que el sistema de muros de cristal aporta anualmente $3.13\text{kg de CO}_2/\text{m}^2$, el steel stud acumula $6.8\text{kg de CO}_2/\text{m}^2$ y el sistema constructivo a base de insulpanel genera $2.05\text{ kg de CO}_2/\text{m}^2$ construido.

La categoría de impacto en segunda instalación mayor es el potencial de smog que este asu vez genera $2.1\text{ kg O}_3\text{ eq}/\text{m}^2$ construido en el sistema constructivo del block de concreto, $0.17\text{ kg O}_3\text{ eq}/\text{m}^2$ del sistema constructivo del insulpanel, $0.20\text{ kg O}_3\text{ eq}/\text{m}^2$ construido en el sistema constructivo de muros de cristal y $0.52\text{ kg O}_3\text{ eq}/\text{m}^2$ construido en el sistema constructivo de muros de steel stud.

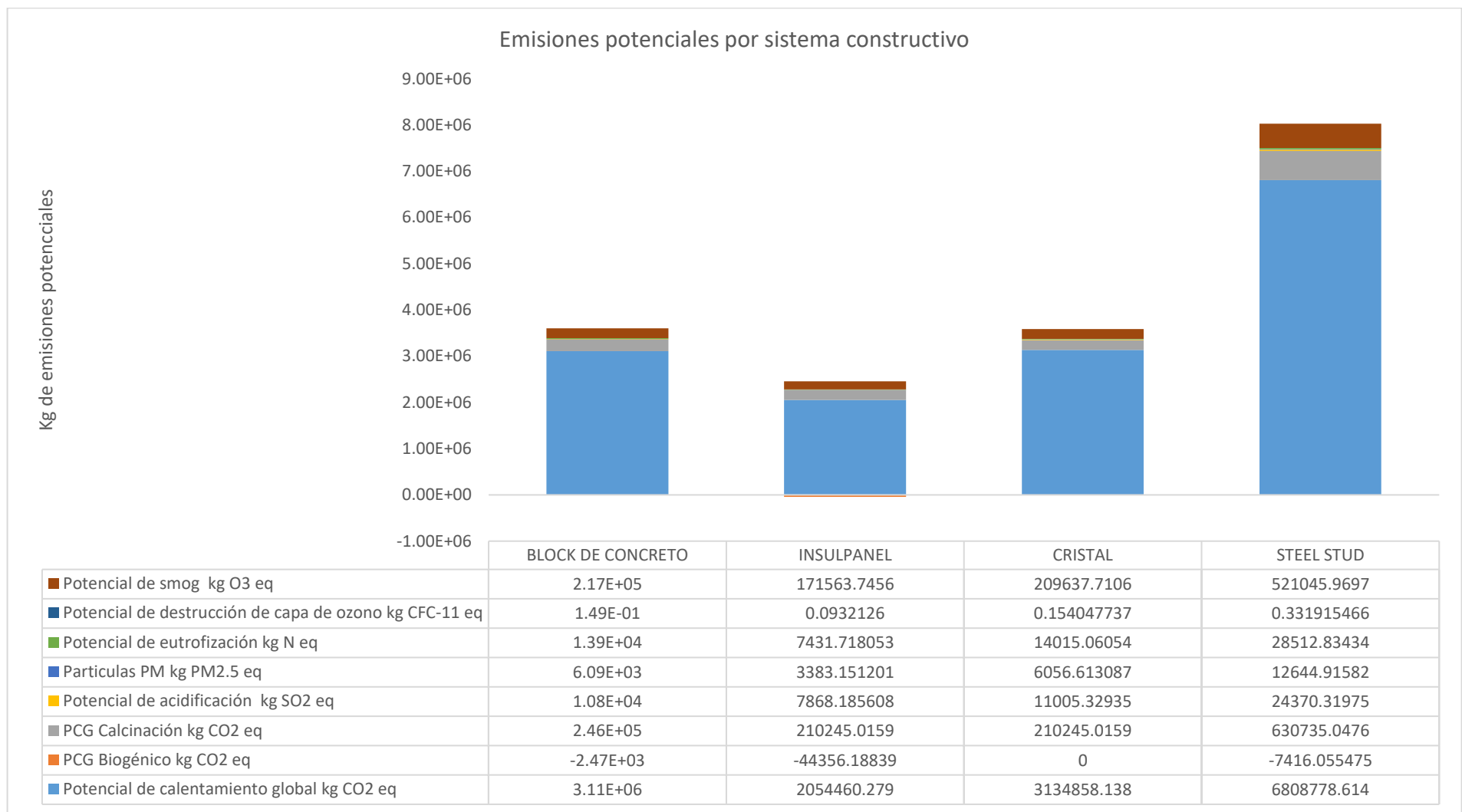


Figura 4.18 Emisiones potenciales por sistema constructivo

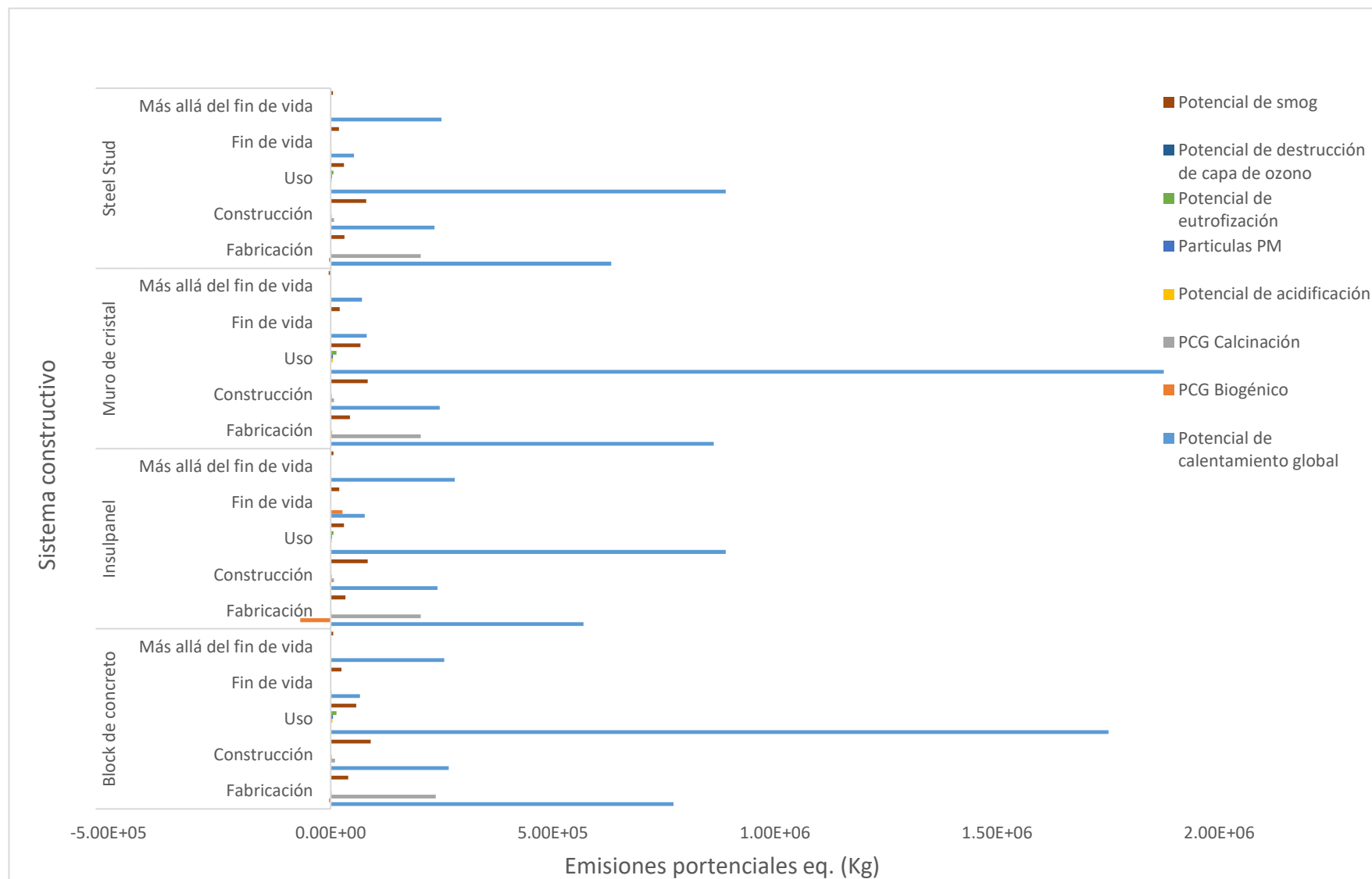


Figura 4.19 Emisiones potenciales por sistema constructivo por etapas del ciclo de vida

Estudios realizados (Emami et al., 2019; Feehan et al., 2021; Soust-Verdaguer et al., 2023) han reportado resultados de ACV en edificaciones donde los impactos ambientales de mayor importancia son el potencial de calentamiento global y el consumo de energía primaria, traducido de otra manera los materiales de construcción contienen energía incorporada en cada una de las etapas de ciclo de vida (Nehasilová et al., 2022).

4.4.1 Consumo de energía

Como resultado del ACV la energía primaria consumida es de 5.24×10^7 MJ la energía no renovable consumida y el consumo de combustible fósil es de 3.42×10^7 y 3.82×10^7 respectivamente ver tabla 5.1, de acuerdo a la energía operacional B1-B6 es equivalente al 31.45% de la energía consumida a lo largo del ciclo de vida. Mientras que la etapa de construcción representa únicamente el 10.52% del consumo total de energía. Algunos estudios que se han realizado sobre el ACV han proporcionado herramientas para el aprovechamiento de los recursos renovables, pero no han sido analizadas (Cavalliere et al., 2019; Feng et al., 2020; Gardner et al., 2020; Gomes et al., 2019)

4.4.2 Residuos sólidos de construcción y demolición

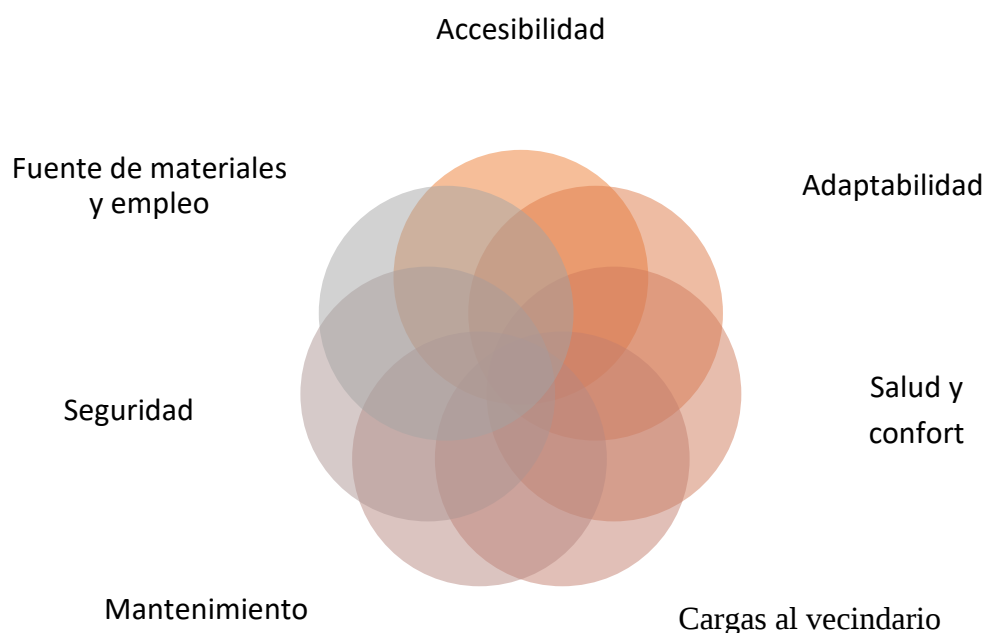
El concreto es el material mayormente utilizado en la industria de la construcción por su bajo costo, la disponibilidad de materia prima y sus propiedades y capacidades mecánicas en relación a lo anterior se estima que un tercio de los residuos sólidos de construcción se compone del concreto y sus derivados, los residuos de concreto son transportados en camiones de carga a los vertederos para la eliminación, sin embargo en esta disposición las leyes ambientales hacen atractiva la opción del reciclaje por sus abundantes beneficios por esta razón este proceso ha recibido una gran atención (Tang et al., 2020).

Al final de vida útil de un edificio, las prácticas de demolición selectiva y la sedación de residuos en la fuente de origen han resultado fundamentales para proporcionar fracciones y recolección de RCD, en Suecia se ha desarrollado un esquema de certificación Miljöbyggnad para mejorar la sostenibilidad de los materiales de los edificios (Nußholz et al., 2019a) También existen otros esquemas de certificación de edificios, por ejemplo BREEAM, DGNB, HQE, LEED que también toman en cuenta el uso de materiales y la gestión adecuado de los RCD. La realización de auditorías previas a la demolición puede ayudar a lograr este objetivo, al proporcionar un inventario completo de materiales en el edificio que se va a demoler (Akanbi et al., 2018).

4.5 Análisis de ciclo de vida dimensión social

En este apartado se muestra el inventario del análisis de ciclo de vida de la dimensión social (ACVS) donde se describen a través del ciclo de vida del edificio la aportación social e interacción de la comunidad para la construcción del edificio como la fuente de generación de empleo por las empresas dedicadas a la manufactura de productos, materiales y servicios para la construcción, así como empresas dedicadas a la mano de obra que contribuye a la construcción del edificio y la generación de RCD durante esta etapa, así mismo empresas dedicadas al mantenimiento, operación y renovación, reemplazamiento de piezas y componentes del edificio durante su vida útil, al final de su vida útil los empleos generados por el procesos de deconstrucción y procesos de separación y tratamiento de los RCD y así poder establecer cuáles materiales reciclar, reutilizar, recuperar para recuperar la energía incorporada en los Materiales de construcción (MC)

Por otra parte, se analiza el comportamiento social del edificio de acuerdo a la norma española (E-en, 2023) que propone las siguientes categorías de análisis para la evaluación social de una edificación o parte de ella.



Elaboración propia a partir de datos de la norma Une-en-15643-3

Figura 4.20 Categorías de impacto social

4.5.1 Inventario de ACVS

De acuerdo a lo establecido en la norma (E-en, 2023) y para la realización de este análisis se visitó a las empresas productoras de materiales de construcción, transportadoras, constructoras, desarrolladoras e inmobiliarias, para obtener el inventario de la generación de empleos por los procesos en cada una de las etapas del ciclo de vida ver figura. 4.21

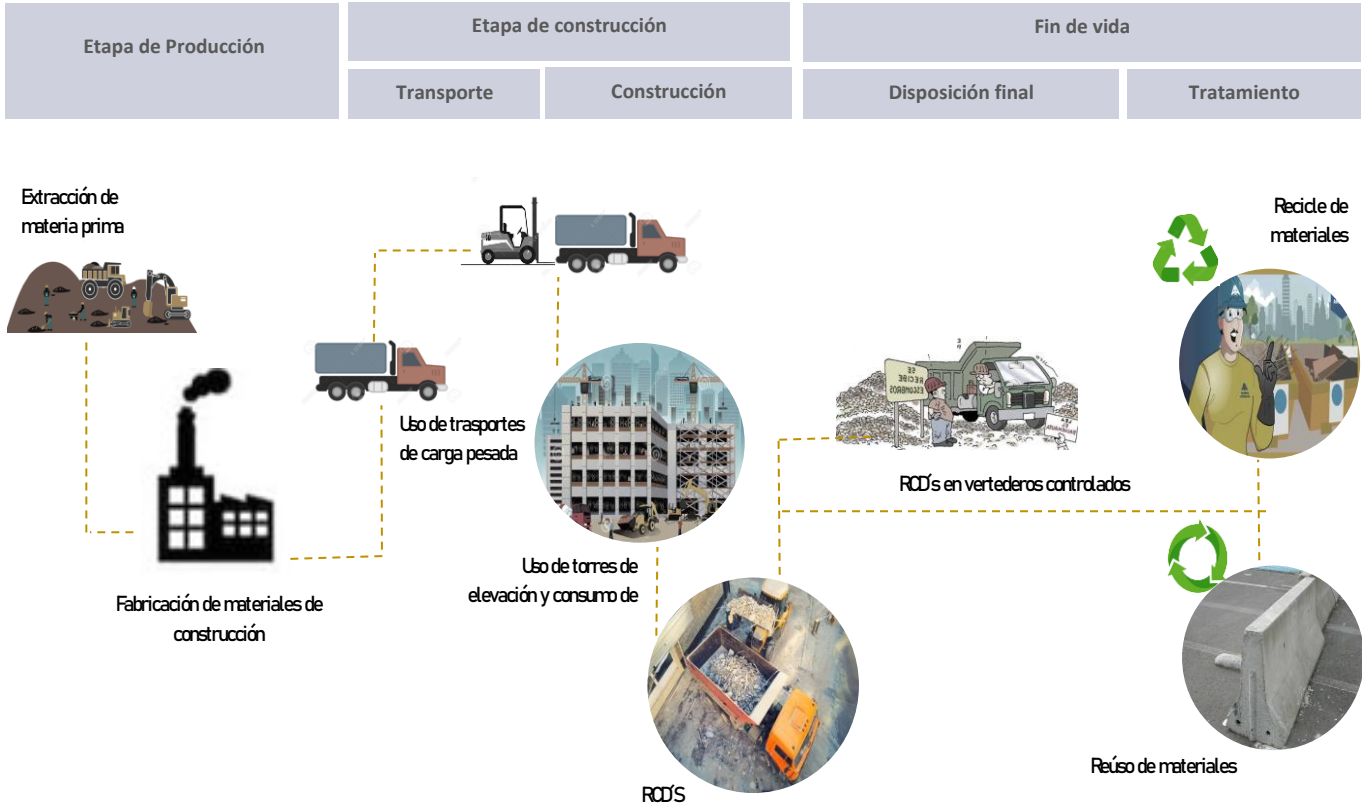


Figura 4.21 Procesos analizados en el inventario de ciclo de vida dimensión social

Con la información recabada por las empresas se realizó el inventario para por procesos dando como resultado que para la etapa de producción las empresas visitadas albergan 57 empleos formales, en la etapa de construcción incluyendo transportes generan 184 empleos directos durante la etapa de construcción del edificio, para la etapa de uso se espera que se cuenten con 12 empleos formales para el desarrollo habitacional, quedando excluido el dominio hotelero y plaza comercial con la que contará el edificio, en las etapas de fin de vida y de malla del fin de vida se esperan 21 y 15 empleos formales respectivamente. Ver figura 4.22

Etapa de producción		Etapa de construcción	Etapa de uso	Etapa de fin de vida
FABRICACIÓN DE CONCRETO Calibrador 1 Operador de maquina 2 Coordinador 1 Supervisor 1 Ventas 5 Guardia 3 Laboratorio de calidad 4 Laboratorio de residuos peligrosos 1 Montacargas 2		DISTRIBUCIÓN DE CONCRETO Operador de camión 10 Operador de bomba 3	PERSONAL EN OPERACIÓN Mantenimiento 2 Reparaciones 2 Coordinador 1 Guardias 4 Recepción 3	PERSONAL EN FIN DE VIDA Demoleedor 3 Plantilla admón. 5 Transportistas 3 Auxiliares 10 Recolectores 15 21 empleos formales
FABRICACIÓN DE BLOCK DE CONCRETO Calibrador 1 Operador de maquina 2 Coordinador 1 Supervisor 1 Ventas 1 Guardia 3 Laboratorio de residuos peligrosos 1 Montacargas 1		DISTRIBUCIÓN DE BLOCK DE CONCRETO Operador de camión 1	5	Mas allá de fin de vida
FABRICACIÓN DE CERAMICOS Calibrador 1 Operador de maquina 2 Coordinador 1 Supervisor 2 Gerencia 1 Ventas 6 Guardia 3 Laboratorio de calidad 4 Laboratorio de residuos peligrosos 1 Montacargas 2 Almacen 2		PERSONAL EN CONSTRUCCIÓN DE TORRE ELEVE Carpinteros 12 Cristales 5 Operadores de máquinas 5 Elevador 2 Elevación de materiales 9 Decoradores 2 Yeseros 9 Piseros 7 Canastillas 5 Demoladores 4 Ranuradores 3 Compras 1		15 empleos informales
57 empleos formales		Portero 4 Guardias 3 Recepcionista 1 Coordinador 1 Supervisor 10 Albañil 35 Plomeros 10 Eléctricos 10 Ayudantes 5 Tablaroqueros 9 Limpieza 8 Pintores 6 Ventas 6		
		DISTRIBUCIÓN DE CERAMICOS Operador de camión 3	12 empleos formales	
184 empleos formales				

Figura 4.22 inventario de ciclo de vida de empleos por procesos

Por otra parte, el desarrollo vertical se analizó con lo con contará según su diseño e instalaciones para la parte de seguridad, accesibilidad, mantenimiento y adaptabilidad al cambio y sus subcategorías de evaluación en la figura 4.23 se muestran las categorías que se observaron, y las que cuenta desde proyecto o durante la construcción mismas que se encierran en los recuadros punteados siendo estos una representación del 60% a favor del usuario y vecindario contra un 40% desfavorable, siendo el vecindario el más afectado. Algunos escenarios alternativos podrían

ser prevenir el edificio de la radiación solar, para disminuir sus ganancias térmicas solares y menor mantenimiento a las envolventes, así mismo la utilizar materiales con mayor resistencia a las altas temperaturas, en la categoría de cargas al vecindario se pudiera trabajar en la disminución de la contaminación acústica y visual.

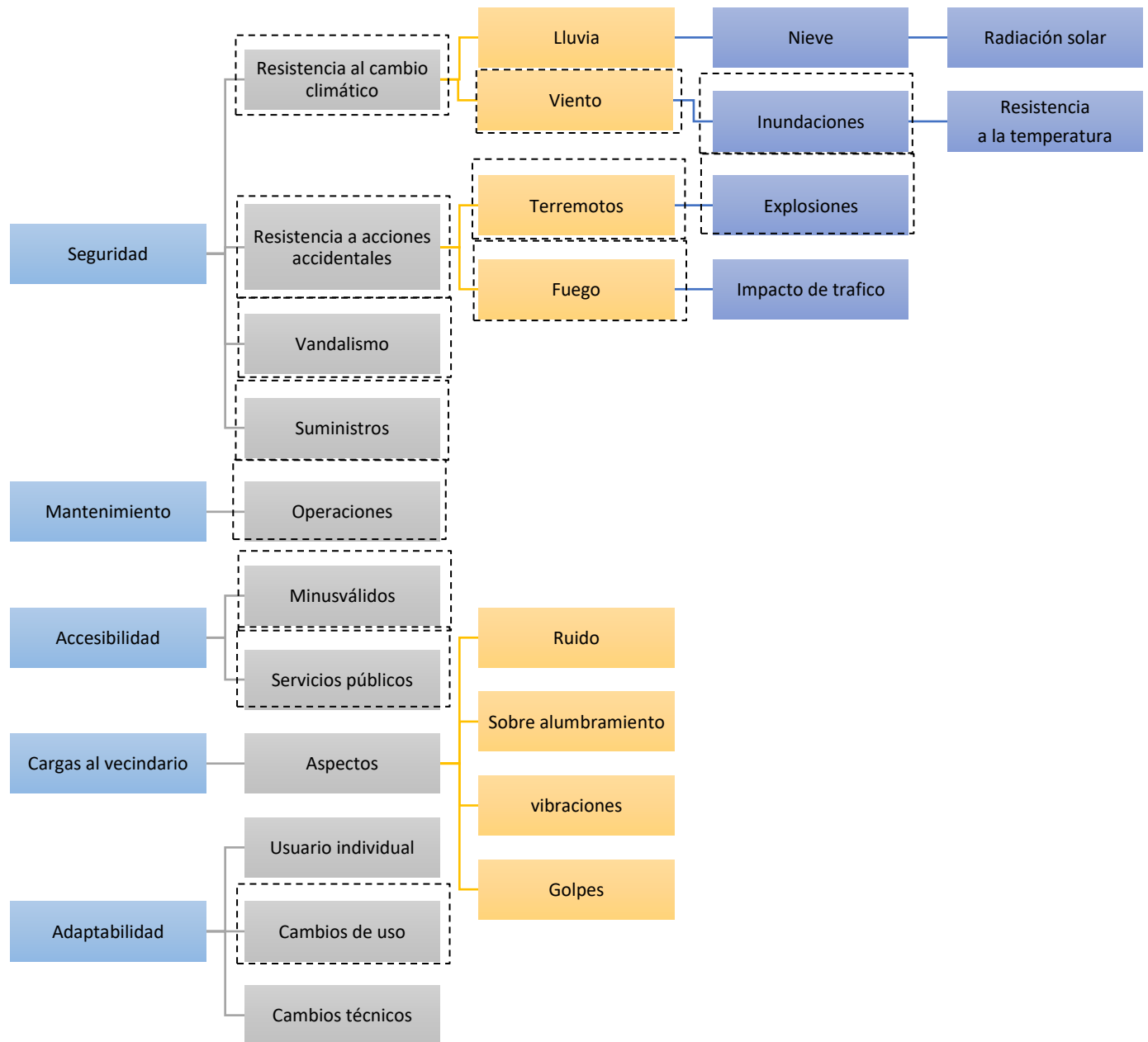


Figura 4.23 Categorías de impacto social observadas

4.6 Análisis de ciclo de vida dimensión económica

La dimensión económica o costo de ciclo de vida, contempla los costos de ciclo de vida previos a la construcción, durante la construcción, los costos en etapa de uso, fin de vida y más allá del fin de vida descritos en la norma (E-en, 2023), ver figura 4.24, el alcance de esta dimensión es contemplar los costos durante el proceso de construcción y analizar los costos de los residuos generados por unidad funcional que se definió para analizar la dimensión ambiental.

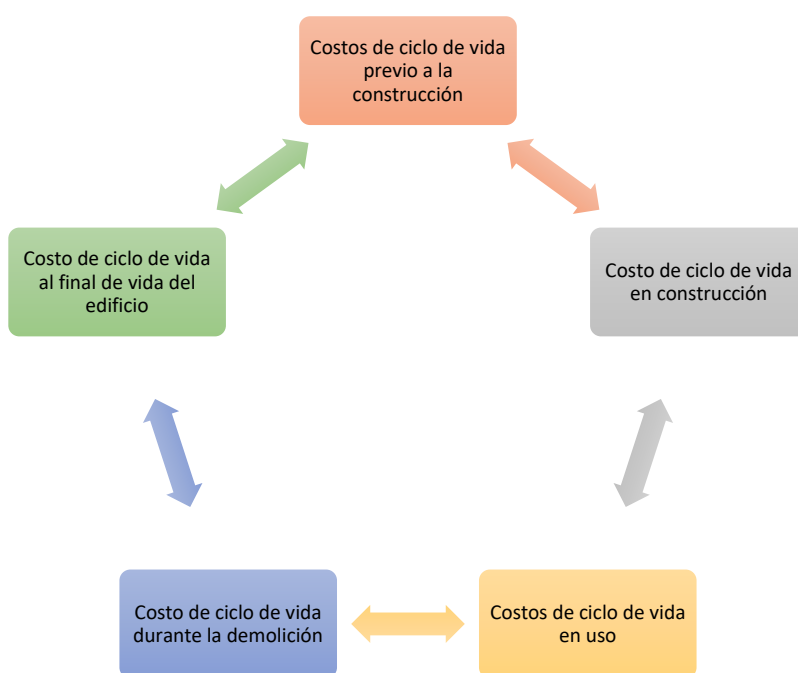


Figura 4.24 Costo de ciclo de vida: Dimensión económica

El costo de ciclo de vida (CCV) de la edificación se aplicó para obtener los costos de mano de obra, costo de materiales, insumos, combustibles, agua, electricidad etc., el análisis del CCV presentado se usó para la misma unidad funcional que en la dimensión ambiental, que fue 1000 m² de construcción mismos elementos constructivos utilizados en la evaluación ambiental. (E-en, 2023, 2023).

El límite del sistema incluye las etapas de fabricación y producción de materiales de construcción, distribución a obra, el ensamblaje o construcción, el uso del edificio y la demolición, es decir, desde A1-C4 y cada sub etapas, de las fases del CCV, excluyendo la infraestructura, es decir, la construcción de las fábricas de materiales, la compra de la maquinaria y la adquisición del

transporte para la distribución, así mismo en la etapa de la construcción se excluyeron la renta de maquinaria y equipo y grúas de elevación, elevadores, etc. En la etapa de uso se analizaron los costos actuales, no incluyó el aumento de los costos durante los 85 años de uso del edificio, para la etapa de demolición, los costos de demolición incluidos fueron los actuales, sin considerar el incremento del costo en el tiempo, se excluyó el suministro o renta de equipamiento, únicamente se analizó el consumo de combustible, y salarios para los operadores, gerencia y personal profesional en el área. Se excluyó la etapa de más allá del fin de vida porque los procesos e inventarios no son conocidos en la región.

De acuerdo a los costos que presenta la cámara mexicana de la industria de la construcción (CMIC) el valor del m² de construcción para edificaciones multifamiliares de lujo tiene un valor aproximado de 30,000 a 36,500 pesos mexicanos, que pueden variar en funciones de los materiales, de la ubicación, de la altura de la construcción, del diseño etc. De acuerdo a este valor de referencia se analizó la unidad funcional en cuanto a costos de construcción y residuos generados a lo largo del ciclo de vida de la edificación considerando únicamente la envolvente de block de concreto, escenario base, presentado en la figura 4.25 se muestra los costos para materiales, maquinaria y para salarios de mano de obra de la construcción los costos por cada etapa, e indica que al menos un 4% de material se va a disposición durante las etapas de fabricación y de construcción equivalente aproximado a 20,000,000.00 M.N.

4.6.1 Inventario de ciclo de vida (ICCV) para la mano de obra, Materiales y herramienta

En esta sección se presenta el ICCV para las etapas A1-C4 donde se describen los salarios para cada uno de los integrantes de las empresas que colaboran en los procesos de construcción, excluyendo los empleos no formales, y solamente se incluyeron los salarios para los elementos contratados por la empresa. En la tabla 12 se registra el resumen del ICCV.

Tabla 4.2 ICCV de mano de obra por etapa de construcción

ETAPA	SALARIOS				
	FABRICACIÓN	CONSTRUCCIÓN	USO	FIN DE VIDA	MÁS ALLÁ DE FIN DE VIDA
Mano de obra	\$ 2,153,200.00	\$ 9,473,000.00	\$ 46,920,000.00	\$ 10,221,000.00	
	Materiales y combustibles				
Etapa	Fabricación	Construcción	Uso	Fin de vida	Más allá de fin de vida
Costo de materiales y combustibles	\$ 4,043,787.36	\$ 25,653,176.08	\$ 8,160,000.00	\$ 10,221,000.00	
Residuos	\$ 199,782.75	\$ 555,247.16			

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos salariales y de consumo de combustibles.

El inventario de ciclo de vida, proporciona información relevante sobre los costos en la construcción, así como de los residuos de construcción y demolición (RCD). Para la unidad funcional propuesta el costo es de \$755.02/m² de construcción para los costos de residuos de material prima y combustibles para su transporte a los rellenos sanitarios o sitios de disposición final, sin tener un tratamiento o reciclaje oportuno.

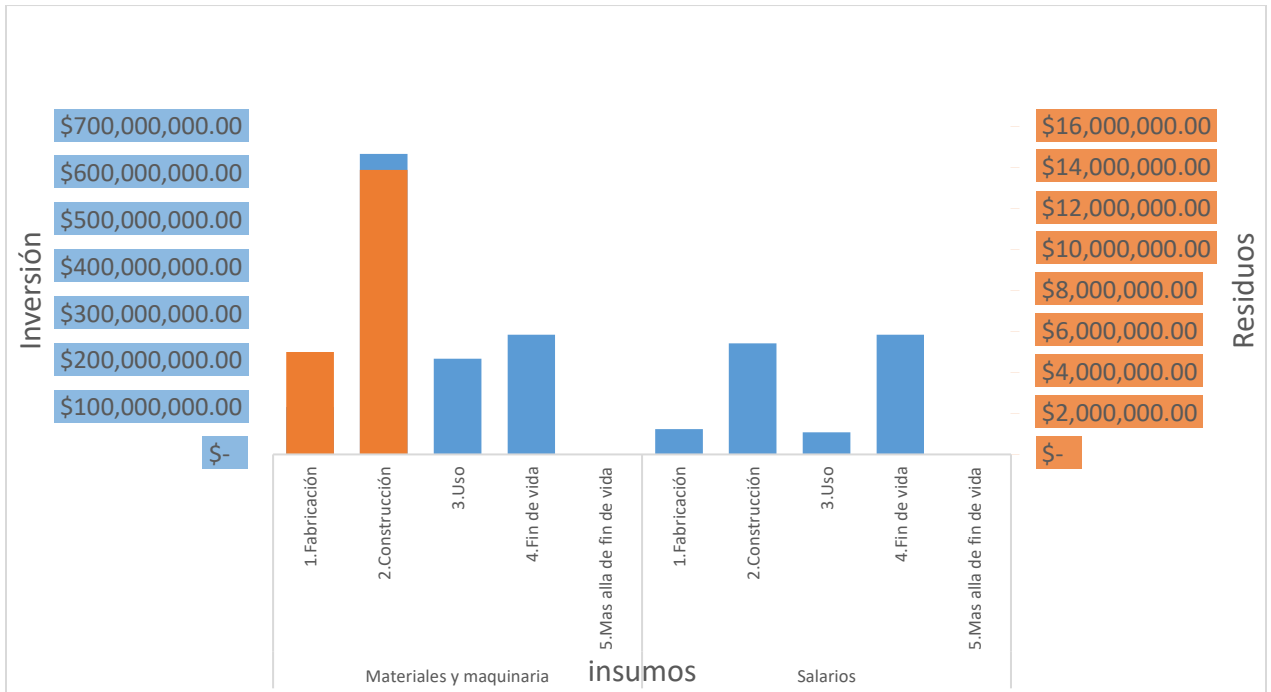


Figura 4.25 Costos de ciclo de vida del edificio vertical

Estos resultados muestran la importancia de rediseñar para disminuir el porcentaje de residuos, iniciando con la concepción del diseño arquitectónico y/o a su vez promoviendo la industria del reciclaje de RCD en la ciudad donde se generen grandes cantidades de RCD, adicional a ello, se debe prever que en la etapa más allá del fin de vida, se van a disponer grandes cantidades de residuos con la ausencia de una industria dedicada al reciclaje de residuos de construcción y demolición (RRCD).

Los residuos de construcción y demolición (RCD) están presentes en todas las etapas del ciclo de vida de la construcción, sin embargo, en la etapa de fin de vida la demolición del edificio genera más residuos a diferencia del resto de las etapas, es en este proceso donde se ve obligado el uso de la economía circular (MÉXICO, 2021)

La economía circular busca romper paradigmas modernos por la escasa disponibilidad de recursos y esta condición se manifiesta con intensidad por la gran cantidad de residuos producidos y generados durante el ciclo de vida del edificio, el aprovechamiento de estos residuos es un factor

para el desarrollo económico capaz de crear empleo y mejorar la industria de la construcción, proveer con seguridad los suministros de materiales, reducir los costos, los residuos y las cargas ambientales como los GEI (De Pascale et al., 2023).

Para ello en el en la industria de la construcción se propone utilizar los residuos de construcción como materia prima o material recuperado para el ingreso de nuevos materiales que se usaran para satisfacer nuevas necesidades sin extraer material virgen de la naturaleza tal como se ve en la figura 4.26.

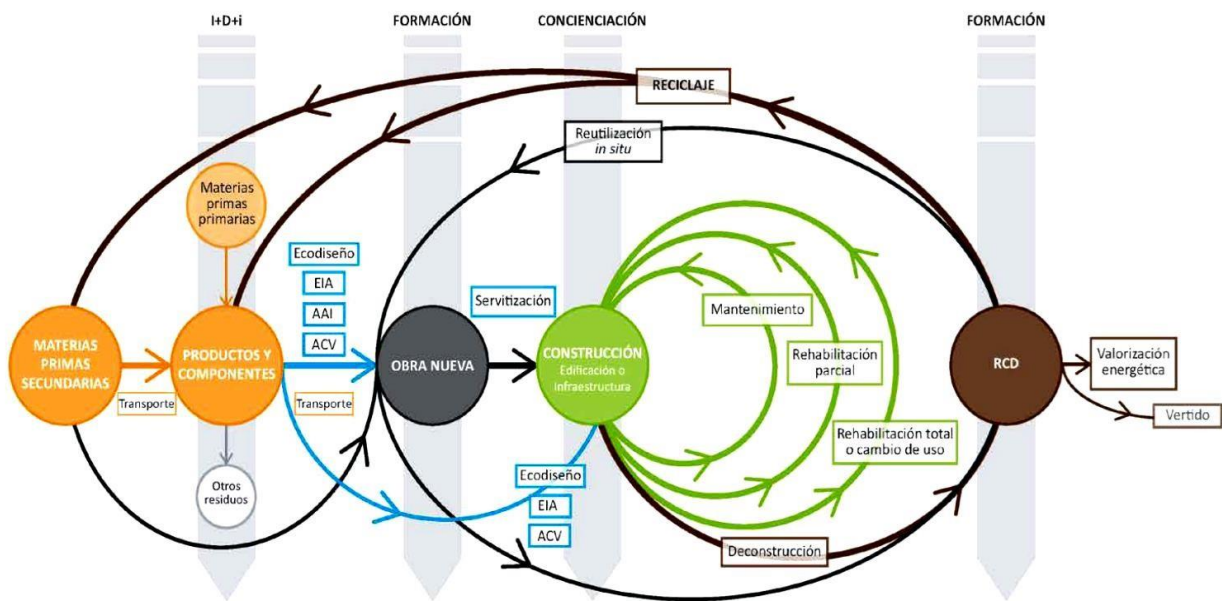


Figura 4.26 Economía circular aplicada a la industria de la construcción

4.7 ACV Dimensión ambiental con Simapro.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos y se describen a continuación.

En la figura 4.27 se presenta la etapa de fabricación de materiales de construcción, en esta etapa los impactos ambientales son mayores, esto se atribuye principalmente al consumo en exceso de materia prima, extraída de la naturaleza y el combustible utilizado durante los procesos, así como el consumo de energía primaria para la transformación y distribución de los materiales de construcción transportados a la obra tal y como lo describen en la literatura las investigaciones. (Abouhamad & Abu-Hamd, 2020; *Environmental Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Aggregate Production Industries*, 2017; Fořt & Černý, 2020; Su et al., 2020; H. Wang et al., 2020; Zabalza, 2012; Zhou et al., 2020)

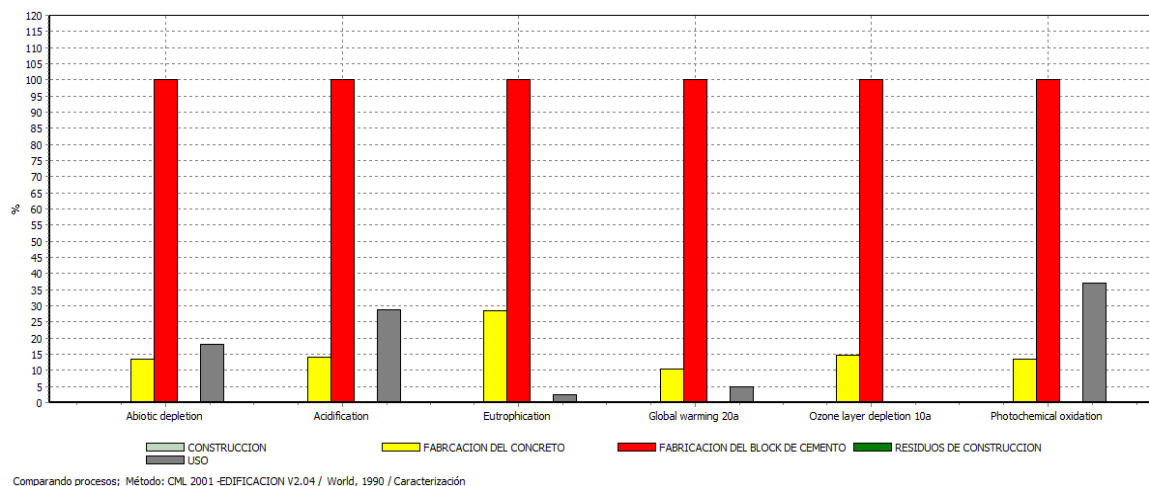


Figura 4.27 caracterización de impactos por etapas de ciclo de vida

Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se proponen algunas soluciones, pero sugieren una serie de estudios y políticas públicas para llevarse a cabo, por ejemplo, el uso de la energía para la construcción vertical, la fabricación de materiales y el uso del edificio, de acuerdo a la literatura (Abouhamad & Abu-Hamd, 2020; Cavalliere et al., 2019; Elnimeiri & Gupta, 2008; Emami et al., 2019; Feng et al., 2020; Gardner et al., 2020; Gomes et al., 2019; Hoxha et al., 2017; International Energy Agency IEA, 2015; Shi et al., 2019; United Nations Environment Programme, 2020). En la etapa de fabricación y consumo de energía en la construcción es una de las etapas que consume más energía primaria no renovable (Aneesh et al., 2018), (Pan et al., 2015), (Bhochhibhoya et al., 2017), (Trunzo et al., 2019) (Z. Wang et al., 2020). Es por ello que surge la necesidad implementar en la industria el consumo energético renovable o maquinaria con características de alta eficiencia energética que reduzcan significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y para ello se requiere análisis sobre cómo afecta el clima la producción en el consumo de energía, y como aprovechar la radiación solar para favorecer los procesos del ciclo de vida de un edificio, no solamente con la climatización artificial. Es decir, se requiere analizar el consumo energético actual de cada proceso para cada mes del año de acuerdo a los hallazgos, proponer mejoras en la solución a reducir el consumo energético, o bien otra solución para reducir consumos y aprovechar la radiación solar es incentivar a las empresas que utilicen estrategias como generar su propia energía con la energía solar disponible en la región (Santillán-Soto et al., 2015) (Cueto et al., 2015).

5. Conclusiones y recomendaciones

Esta investigación abordó la evaluación ambiental de los procesos de construcción de una edificación vertical utilizando la metodología del ACV. Se realizaron los inventarios de los procesos de construcción de un caso de estudio, se evaluaron los procesos aplicando el ACV a un edificio en etapa de construcción tomando como base las etapas de la norma EN 15978, para evaluar el impacto ambiental generado según las etapas y la energía consumida,

Los resultados del estudio de caso mostraron que la etapa de mayor consumo es la de construcción, por ser un periodo corto en relación con la etapa de uso, que fue programada para 85 años. Los impactos ambientales que se identificaron en este estudio fueron el potencial de calentamiento global y el potencial de smog.

Se propusieron tres escenarios, uno de ellos fue alargar el tiempo de vida del edificio, en tres periodos, 85 100 y 150 años; los resultados mostraron que, al aumentar el tiempo de vida del edificio, se disminuyen los impactos ambientales y las cargas evitadas aumentan. El segundo escenario que se propuso fue reducir el consumo de energía fósil para la etapa de uso, sustituyéndola por energía limpia instalando paneles solares, disminuyendo la energía 10, 50 y 90%. Al disminuir el consumo de energía primaria no renovable, se disminuyen los impactos ambientales como el calentamiento global y el potencial de smog.

En el tercer escenario, se compararon los sistemas constructivos para muros de envolvente e interiores entre ellos el muro de cristal en fachadas, el muro de insulpanel, los muros de material ligero como el steel stud, comparando los impactos ambientales con el block de concreto del escenario base. Los resultados mostraron que el sistema de muros acristalados y el muro de block presentaron un comportamiento ambiental similar durante el ciclo de vida de la edificación sin embargo el potencial de recuperación de cristal por desinstalación previa a la demolición pone en desventaja al muro de block que será demolido y procesado como material reciclado para generar nuevos materiales de construcción. Pero si el material se dispone para usarse como relleno el sistema con mayor carga ambiental es el steel stud y es un material que en los procesos de demolición no se puede reutilizar.

Con relación al análisis social y económico, se observa una cadena de empleos robusta y sustentable para la generación de proyectos de construcción en todo el ciclo de vida, Los resultados muestran que la planificación del proyecto debe incluir estrategias para minimizar las cargas, como la contaminación acústica, lumínica, luz reflectiva solar, vibraciones y golpes.

La aplicación del ACV, es una herramienta que permite evaluar los impactos económicos en relación a los residuos de construcción en las etapas del ciclo de vida, estableciendo pautas para reducir la generación de residuos desde la concepción del proyecto y su aprovechamiento una vez

que se genere el residuo, para ello es importante la supervisión y capacitación del personal de campo para lograrlo.

Una construcción sustentable implica reducir los impactos ambientales, así como la reducción del consumo de energía en cada una de las etapas, se debe incentivar a las empresas para el desarrollo y uso de nuevos materiales a partir del reciclaje de los residuos de construcción, involucrando a los diseñadores y tomadores de decisiones sobre la construcción de edificación vertical para optimizar el uso y consumo de los recursos.

Con relación al impacto social que generó esta construcción fue favorable porque generó empleos directos e indirectos, Así mismo se suma en esta área las estrategias de diseño bioclimático que reduce la carga por radiación solar en la envolvente e incrementa la resistencia a las altas temperaturas en épocas de verano y por último desarrollar desde proyecto un análisis del impacto vial a través de un manifiesto vial bien estructurado y análisis de la densidad vial que generará la construcción de edificios altos para usos mixtos.

Con relación al impacto económico generado, de acuerdo a la categoría de costos de ciclo de vida también presentó impactos, aunque el volumen de residuos generados es sólo el 5% de unidad funcional establecida equivalente a 1000 m² de construcción, esta genera 300 m³ de material que se envía a disposición final para utilizarlo para rellenos en terrenos accidentados, esto equivale a un costo 20 millones de pesos.

De acuerdo a lo anterior se concluye que la propuesta de mejora está directamente relacionado con el ACV previamente a la edificación realizando diseños pasivos de aprovechamiento del clima combinados con sistemas activos de climatización artificial para reducir el consumo de energía en la climatización, ventilación e iluminación y que los mejores sistemas constructivos actualmente son el muro de cristal en fachadas y muros de block de concreto, que sean diseñados hasta una vida útil de 250 años con un mantenimiento correcto, que generen al menos el 90% de la energía que consumen, que en sus etapas de ciclo de vida reduzcan los residuos generados entre el 1% y 2%, una de las posibilidades es desarrollar un escenario comparando diferentes tipos de estructuras para comparar el concreto con acero y sus posibles combinaciones.

Por último, es importante la actualización de bases de datos incorporados a los sistemas de cuantificación de impactos ambientales, pues para la región de Latinoamérica se requiere una amplia investigación sobre esta área.

Los edificios consumen grandes cantidades de materiales y energía, lo que los convierte en uno de los mayores factores de impacto ambiental. Cuantificar el impacto de los materiales de construcción puede ser fundamental para desarrollar una estrategia eficaz de mitigación de los gases de efecto invernadero.

Recomendaciones

Actualización de Bases de Datos: Es crucial actualizar las bases de datos incorporadas a los sistemas de cuantificación de impactos ambientales. Para la región de Latinoamérica, se necesita una amplia investigación en este rubro. Dado que los edificios consumen grandes cantidades de materiales y energía, se convierten en uno de los mayores factores de impacto ambiental. Cuantificar el impacto de los materiales de construcción es fundamental para desarrollar estrategias eficaces de mitigación de gases de efecto invernadero.

Generación de Bases de Datos Detalladas: Generar bases de datos basadas en estudios de caso para la realización de inventarios de impactos ambientales, sociales y económicos. Estas bases deben incluir las componentes de cada sistema constructivo e integrar nuevos sistemas constructivos a las bases de datos existentes en la construcción de edificaciones verticales.

Legislación y Recompensas: Establecer leyes y recompensas para empresas y edificaciones que utilicen tecnologías relacionadas con la generación de energía renovable. Esto incluye tanto los procesos de fabricación como de construcción y uso, incentivando así la adopción de prácticas sustentables.

Estrategias de Diseño Sustentable: Implementar desde la fase de diseño estrategias de reducción de residuos de construcción y demolición (RCD) y su tratamiento. Además, diseñar aprovechando las condiciones climáticas para disminuir el consumo energético.

Se recomiendan las siguientes líneas de investigación:

Análisis de ciclo de vida de los residuos de construcción y demolición.

Análisis del ciclo de vida de la vivienda en serie.

Análisis de la problemática que generan las partículas $PM_{2.5}$ que se desarrollan en la construcción y que precipitan en la costa y el mar con apoyo de imagen satelital y detección de imagen manual.

Desarrollar materiales que de bajo impacto ambiental y de bajo costo

Diseñar e implementar equipamiento para el tratamiento de los RCD y reincorporación.

6. Referencias

- Abouhamad, M., & Abu-Hamd, M. (2020). Life cycle environmental assessment of light steel framed buildings with cement-based walls and floors. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su122410686>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Davila Delgado, M., Bilal, M., & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(November 2017), 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Aleluia, J., & Ferrão, P. (2016). Characterization of urban waste management practices in developing Asian countries: A new analytical framework based on waste characteristics and urban dimension. *Waste Management*, 58, 415–429. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.008>
- Anaya Estevez, P. E., Castellanos Rojas, H. A., Ceballos Molina, J. A., & Cifuentes Ramírez, C. P. (2018). *Propuesta matriz de factores para la estimación de la vida útil de las construcciones en Colombia con base en la Norma ISO 15686 1*.
- Aneesh, N. R., Shivaprasad, K. N., & Das, B. B. (2018). Life cycle energy analysis of a metro station building envelope through computer based simulation. *Sustainable Cities and Society*, 39(February), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.006>
- Bar-Kana, I., & Guez, A. (1991). Simplified techniques for adaptive control of robotic systems. *Control and Dynamic Systems*, 40(P2), 147–203. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-012740-5.50009-8>
- Bhochhibhoya, S., Zanetti, M., Pierobon, F., Gatto, P., Maskey, R. K., & Cavalli, R. (2017). The global warming potential of building materials: An application of life cycle analysis in Nepal. *Mountain Research and Development*, 37(1), 47–55. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00043.1>
- Bovea, M. D., & Powell, J. C. (2016). Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management*, 50, 151–172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.036>
- Brundtland. (1987). *Nuestro futuro común*. (Jordan Hil).
- Calvente, I. A. M. (2007). *El concepto moderno de sustentabilidad*. 1–7.
- Cavalliere, C., Hollberg, A., Dell’Osso, G. R., & Habert, G. (2019). Consistent BIM-led LCA during the entire building design process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012099>
- Cochran, K., Townsend, T., Reinhart, D., & Heck, H. (2007). Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US. *Waste Management*, 27(7), 921–931. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.023>
- Cueto, R. G., Soto, N. S., Rincón, Z. H., Benítez, S. O., & Morales, G. B. (2015). Parameterization of net radiation in an arid city of northwestern Mexico. *Atmosfera*, 28(2), 71–82. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.02.01>

- De Pascale, A., Di Vita, G., Giannetto, C., Ioppolo, G., Lanfranchi, M., Limosani, M., & Szopik-Depczyńska, K. (2023). The circular economy implementation at the European Union level. Past, present and future. *Journal of Cleaner Production*, 423(May). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138658>
- del Río Merino, M., Saez, P. V., & Antelo, F. T. (2017). Reverse logistics applied to building companies. Demolition stage= Logística inversa aplicada a las empresas de edificación. Fase de demolición. *Building & Management*, 1(2), 12-23.
- E-en, U. N. E. (2023). *español la*.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona Mali, Y., Kadner, S., Minx, J. C., Brunner, S., Agrawala, S., Baiocchi, G. U., Alexeyevich Bashmakov, I., Blanco, G., & Broome, J. (2014). *TS Technical Summary Coordinating Lead Authors: Lead Authors*.
- Elnimeiri, M., & Gupta, P. (2008). Sustainable structure of tall buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(5), 881–894. <https://doi.org/10.1002/tal.471>
- Emami, N., Heinonen, J., Marteinson, B., Säynäjoki, A., Junnonen, J. M., Laine, J., & Junnila, S. (2019). A life cycle assessment of two residential buildings using two different LCA database-software combinations: Recognizing uniformities and inconsistencies. *Buildings*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/buildings9010020>
- Environmental Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Aggregate Production Industries*. (2017). 15(3), 1577–1593.
- Feehan, A., Nagpal, H., Marvuglia, A., & Gallagher, J. (2021). Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 43(January), 103138. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103138>
- Feng, H., Liyanage, D. R., Karunathilake, H., Sadiq, R., & Hewage, K. (2020). BIM-based life cycle environmental performance assessment of single-family houses: Renovation and reconstruction strategies for aging building stock in British Columbia. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119543>
- Fořt, J., & Černý, R. (2020). Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste Management*, 118, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- García, F. P., Martínez, Y. R., Sandoval, O. A. A., & Martínez, A. J. G. (2012). Recovery of Waste of Construction , Demolition and Mining Tailings. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(7), 46–63.
- Gardner, H. M., Hasik, V., Banawi, A., Olinzock, M., & Bilec, M. M. (2020). Whole Building Life Cycle Assessment of a Living Building. *Journal of Architectural Engineering*, 26(4), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000436](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000436)
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gencel, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012).

- Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>
- Ghisellini, P., Ji, X., Liu, G., & Ulgiati, S. (2018). Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review. *Journal of Cleaner Production*, 195, 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>
- Gomes, V., Barros, N. N., & Ruschel, R. C. (2019). Building Information Modelling for Whole-Building LCA: BIM4LCA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012044>
- Hernández-Moreno, S., Ocaña-Ponce, J. A., & Mejía-López, M. (2015). Application of ISO 15686 to estimate service life of a dome built with adobe technology in the city of Toluca, Mexico. *Acta Universitaria*, 24(6), 16–20. <https://doi.org/10.15174/au.2014.668>
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>
- International Energy Agency IEA. (2015). Building Energy Performance Metrics-Supporting Energy Efficiency Progress in Major Economies. *Energy Efficiency*, 1–110.
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., & Amor, B. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>
- Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, conservation and recycling*, 52 (1), 58-73.
- Iso. (2006). *española*.
- ISO. (2017). *Buildings and constructed assets ISO 15686-5 2017. 2017.* www.iso.org/TechnicalStandardsDetails?iso=50000
- Kurad, R., Silvestre, J. D., de Brito, J., & Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485–502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.236>
- Kurda, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 139(April 2018), 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., Hauschild M & Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems–Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste management*, 34 (3), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- LGEEPA. (2018). *Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente*. 1–135.
- LGPGIR. (2018). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*. 1–53.
- Mah, C. M., Fujiwara, T., & Ho, C. S. (2018). Life cycle assessment and life cycle costing toward

- eco-efficiency concrete waste management in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3415–3427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.200>
- Meng, Y., Ling, T. C., & Mo, K. H. (2018). Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 298–312.
- NADF. (2015). *Secretaría del medio ambiente*. 7–24.
- Nehasilová, M., Lupíšek, A., Coufalová, P. L., Kupsa, T., Veselka, J., Vlasatá, B., Železná, J., Kunová, P., & Volf, M. (2022). Rapid Environmental Assessment of Buildings: Linking Environmental and Cost Estimating Databases. *Sustainability (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/su141710928>
- Nogués, S., González-González, E., & Cordera, R. (2019). Planning regional sustainability: An index-based framework to assess spatial plans. Application to the region of Cantabria (Spain). *Journal of Cleaner Production*, 225, 510–523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.328>
- Norouzi, M., Chàfer, M., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*, 44, 102704
- Nußholz, J. L. K., Nygaard Rasmussen, F., & Milios, L. (2019a). Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *Resources, Conservation and Recycling*, 141(March 2018), 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.036>
- Nußholz, J. L. K., Nygaard Rasmussen, F., & Milios, L. (2019b). Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *Resources, Conservation and Recycling*, 141(February), 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.036>
- Pan, S. Y., Du, M. A., Huang, I. Te, Liu, I. H., Chang, E. E., & Chiang, P. C. (2015). Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. *Journal of Cleaner Production*, 108, 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.124>
- Regulatory, I., & Authority, D. (2007). *Handbook on*.
- Río Merino, M. Del, Villoria Saez, P., & Torrijos Antelo, F. (2017). Reverse logistics applied to building companies. Demolition stage = Logística inversa aplicada a las empresas de edificación. Fase de demolición. *Building & Management*, 1(2), 12. <https://doi.org/10.20868/bma.2017.2.3550>
- RLGPGIRS. (2014). *Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Última reforma publicada DOF 31-10-2014*. 31–41. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.pdf
- Romero Pérez, A. (2005). Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición. *Instituto Tecnológico De La Construcción*, 109. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190015/Plan_de_Manejo_de_Residuos_de_la_Construccion_y_la_Demolicion_de_la_CMIC.pdf
- Santillán-Soto, N., García-Cueto, R., Haro-Rincón, Z., Ojeda-Benítez, S., Quintero-Núñez, M., & Velázquez-Limón, N. (2015). Radiation balance of urban materials and their thermal impact in semi-desert region: Mexicali, México study case. *Atmosphere*, 6(10), 1578–1589.

<https://doi.org/10.3390/atmos6101578>

Sata, V., Wongsas, A., & Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 42, 33-39.

SEMARNAT. (2019). Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable: Cero residuos. *SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 30.

Shadram, F., & Mukkavaara, J. (2018). An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy. *Energy and Buildings*, 158, 1189–1205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.017>

Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., & Grasley, Z. (2019). Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 225, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.288>

Soust-Verdaguer, B., Palumbo, E., Llatas, C., Velasco Acevedo, Á., Fernández Galvéz, M. D., Hoxha, E., & Passer, A. (2023). The Use of Environmental Product Declarations of Construction Products as a Data Source to Conduct a Building Life-Cycle Assessment in Spain. *Sustainability*, 15(2), 1284. <https://doi.org/10.3390/su15021284>

Su, S., Wang, Q., Han, L., Hong, J., & Liu, Z. (2020). BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. *Building and Environment*, 183(May), 107218. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107218>

Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., & Xue, C. (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation and Recycling: X*, 6(March). <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>

Trunzo, G., Moretti, L., & D'Andrea, A. (2019). Life cycle analysis of road construction and use. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/su11020377>

UNE-EN15978:2012. (2012). *Extracto Del Documento Une-En 15978*.

United Nations Environment Programme. (2020). *Emissions Gap Emissions Gap Report 2020*. <https://www.unenvironment.org/interactive/emissions-gap-report/2019/>

Xuan, D., Tang, P., & Poon, C. S. (2019). MSWIBA-based cellular alkali-activated concrete incorporating waste glass powder. *Cement and Concrete Composites*, 95, 128-136.

Wang, H., Schandl, H., Wang, X., Ma, F., Yue, Q., Wang, G., Wang, Y., Wei, Y., Zhang, Z., & Zheng, R. (2020). Measuring progress of China's circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 163(11), 105070. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105070>

Wang, Z., Yang, D. Y., Frangopol, D. M., & Jin, W. (2020). Inclusion of environmental impacts in life-cycle cost analysis of bridge structures. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(4), 252–267. <https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1542212>

Wei, H., Yan, L., Lu, C., Wen, Z., Yang, Y., Lu, C., & Zhou, Q. (2024). Effects of mixture proportions and molding method on the performance of pervious recycled aggregate concrete *Materials*, 17(21), 5138.

- Wilson, D. M. (2010). Edith Anna Maslin (Jackie) Ronne. *Polar Record*, 46(2), 191–192. <https://doi.org/10.1017/S0032247409990179>
- WRAP, & Green Alliance. (2015). *Employment and the circular economy Job creation in a more resource efficient Britain*. 28. [http://www.green-alliance.org.uk/resources/Employment and the circular economy.pdf](http://www.green-alliance.org.uk/resources/Employment%20and%20the%20circular%20economy.pdf)
- Zabalza, I. (2012). Repensar edificios mediante el análisis de ciclo de vida. *Repensar Canfranc. Taller de Rehabilitación Urbana y Paisaje*, 70–81.
- Zarghami, E., Fatourehchi, D., & Karamloo, M. (2019). Establishing a region-based rating system for multi-family residential buildings in Iran: A holistic approach to sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 50(November 2018), 101631. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101631>
- Zhou, X., Moghaddam, T. B., Chen, M., Wu, S., Adhikari, S., Xu, S., & Yang, C. (2020). Life Cycle Assessment of Biochar Modified Bioasphalt Derived from Biomass. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(38), 14568–14575. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05355>

7. Anexo

Figura 7.1 Inventario de residuos de block de cemento

Elaborado por		Unidad			Ubicación	
Gerardo Gonzales Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de block				
Fecha de Inicio		18/03/2022				
Fecha de termino		20/04/2022				
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Agua		M3	2	prevenir las partículas de polvo		Local
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombro		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino
Residuos de block		m3	6.51			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

Figura 7.2 Inventario de residuos de madera

Elaborado por		Unidad			Ubicación	
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de madera				
Fecha de Inicio		18/03/2022				
Fecha de termino		20/04/2022				
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombro		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino
Residuos de madera		m3	3.5			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

Figura 7.3 Inventario de residuos de acero

Elaborado por		Unidad			Ubicación		
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin			
Descripción del proceso		Residuos de acero					
Fecha de Inicio		18/03/2022					
Fecha de termino		20/04/2022					
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad		Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Residuos de acero		Kg	379.59				
Entrada de agua		Unidades	Cantidad		Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad		Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20		Camión de volteo retiro de escombro		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad		Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

En la tabla 7.4 se describe el volumen de generación de residuos de cartón en 1000 m2 de construcción

Figura 7.4 Inventario de residuos de cartón

Elaborado por		Unidad		Ubicación	
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2	Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de carton			
Fecha de Inicio		18/03/2022			
Fecha de termino		20/04/2022			
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Carton		m3	12		
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombro	Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Destino

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

En la tabla 7.5 se describe el volumen de generación de residuos de hoja de yeso en 1000 m2 de construcción

Figura 7.5 Inventario de residuos de hoja de yeso

Elaborado por		Unidad			Ubicación	
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de carton				
Fecha de Inicio		18/03/2022				
Fecha de termino		20/04/2022				
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Hoja de yeso		m3	5.42			
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombros		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino

En la tabla 7.6 se describe el volumen de generación de residuos de yeso en 1000 m2 de construcción

Figura 7.6 Inventario de residuos de yeso

Elaborado por		Unidad			Ubicación	
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de yeso				
Fecha de Inicio		18/03/2022				
Fecha de termino		20/04/2022				
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Yeso		m3	3.2			
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombros		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

En la tabla 7.7 se describe el volumen de generación de residuos de cerámica en 1000 m2 de construcción

Figura 7.7 Inventario de residuos de cerámica

Elaborado por		Unidad			Ubicación	
Gerardo Gonzalez Espinoza		1000 M2		Mazatlán Sin		
Descripción del proceso		Residuos de ceramica				
Fecha de Inicio		18/03/2022				
Fecha de termino		20/04/2022				
Entrada de materia (Nombre del RCD)		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Ceramica		m3	4.95			
Entrada de agua		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Entrada de energía		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Origen
Diésel		Lts	20	Camión de volteo retiro de escombro		Local
Salida de materiales incluidos productos		Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo		Destino

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo