

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE
EDIFICACIONES MULTIFAMILIARES EN LIMA**

Tesis para optar por el título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Ana Lucía Cáceres Cebrecos

ASESOR: Dr. Ramzy Francis Kahhat Abedrabbo

Lima, marzo de 2016

RESUMEN

Durante los últimos 10 años, el paisaje urbano de la ciudad de Lima ha cambiado drásticamente. Sin embargo, el Plan Metropolitano de Desarrollo Urbano al 2035 Lima y Callao (PLAM 2035), expone que la ciudad tiene un déficit de 431 mil viviendas generando un gran mercado para el negocio inmobiliario.

El sector construcción representa un gran motor para la economía peruana, participando de 6.9% del PBI a nivel nacional (INEI 2016) y es una actividad económica, intensiva en la utilización de recursos naturales, productos industriales, electricidad y agua. Si se considera el uso de las edificaciones además de la actividad constructiva, se comprende el impacto que las mismas puedan tener en el medio ambiente.

En el Perú, no se han desarrollado a profundidad estudios acerca de los impactos que pueda tener la construcción de edificaciones en la naturaleza. Es por ello, que en este estudio se buscó utilizar la herramienta conocida con el nombre de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para comparar dos tipos de edificaciones multifamiliares de viviendas construidas en la ciudad de Lima.

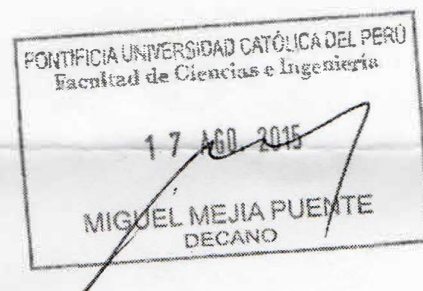
Para poder determinar los impactos de ambas edificaciones se utilizó la herramienta de ACV durante las distintas etapas del ciclo de vida: extracción y manufactura de los materiales, construcción de la edificación, etapa de operación y el fin de vida.

Las metodologías de impacto elegidas para desarrollar el análisis fueron: TRACI 2.1, la cual incluye 10 categorías de impacto entre las cuales podemos encontrar al potencial de calentamiento global, y la metodología para hallar el consumo de energía primaria "Cumulative Energy Demand".

Los resultados obtenidos en el estudio para el primer modelo demostraron un consumo energético primario de 2.38×10^8 MJ y para el segundo modelo un consumo de 4.20×10^7 MJ. Se procedió a hacer un análisis comparativo basado en el metro cuadrado de vivienda como unidad funcional en el que la fase de pre-uso cobra gran importancia: 48% para el modelo 1 y 60% para el modelo 2. Además, se procedió a hacer un análisis por departamento típico a partir del cual se puede concluir que el área del departamento influye directamente en el impacto a lo largo del ciclo de vida.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Edificaciones Multifamiliares en Lima"
Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos
Asesor : Dr. Ramzy Kahhat
Alumno : Ana Lucia Cáceres Cebrecos
Código : 2010.0262.412
Tema N° : 64
Fecha : Lima, 13 de agosto del 2015



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El siglo XXI inició en el Perú con un próspero crecimiento económico. A la par, en el sector construcción se dio el "Boom Inmobiliario" que contribuyó al crecimiento del sector, con un crecimiento anual promedio de aproximadamente 13% entre los años 2006 y 2013, y su importancia en la economía del país con un 6.9% del PBI nacional en el 2013 (INEI 2014, 2013). Promovido en parte por el impulso del sector privado (que incluye a las constructoras e inmobiliarias) y el estado peruano, el "Boom Inmobiliario" ha sido responsable de una masiva construcción de edificaciones de vivienda multifamiliares en toda la ciudad de Lima y las grandes capitales del país.

Existen grandes beneficios económicos y sociales relacionados con la construcción de viviendas multifamiliares, sin embargo, también existen impactos ambientales que deben ser analizados a nivel holístico. La construcción es una actividad económica intensa en el uso de energía y materiales, los cuales están relacionados con impactos ambientales durante su ciclo de vida.

En el Perú, no se han desarrollado a profundidad estudios acerca de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de viviendas multifamiliares. Es por ello que en este estudio se busca aplicar la herramienta de gestión ambiental conocida con el nombre de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para comparar los impactos ambientales de dos tipos de edificaciones multifamiliares construidas frecuentemente en la ciudad de Lima. El análisis contempla las etapas de extracción y manufactura de los materiales, construcción de la edificación, operación y mantenimiento, y fin de vida.

ANTECEDENTES

El ACV es una herramienta de gestión ambiental normada bajo los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Esta herramienta ha evolucionado a lo largo de los últimos años con el propósito de ser una herramienta útil para poder determinar impactos ambientales durante el ciclo de vida de un bien o servicio y descubrir alternativas con menor huella ambiental.

Se cuentan con diversos estudios internacionales que aplican el ACV para hallar los impactos ambientales de edificaciones de oficina, multifamiliares y unifamiliares. Por ejemplo, Junnila y colegas utilizaron el ACV para analizar los impactos ambientales de un edificio en el hemisferio norte: Finlandia (Junnila et al 2006). Asimismo, Keolian y colegas estudiaron el consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar norteamericana (Keoleian et al. 2000). Además, Li et al. compararon el consumo de energía durante el ciclo de vida de dos tipos de viviendas unifamiliares norteamericanas: vivienda de un piso y vivienda de dos pisos (Li et al 2007). Kahhat y colegas investigaron los impactos ambientales durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar, ubicada en el sur oeste de Norte América, con diferentes paredes exteriores (Kahhat et al 2009). Más aún, la totalidad del sector de construcción de viviendas norteamericano fue estudiado por Ochoa y colegas (Ochoa et al. 2002). Recientemente, Bawden y Williams aplicaron el ACV híbrido para analizar los impactos ambientales de viviendas de densidad baja, media y alta (Bawden y Williams 2015). En el Perú, García-Torres y Kahhat, utilizaron el ACV para analizar los impactos ambientales de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Lima (García-Torres y Kahhat, 2015).

OBJETIVO

El objetivo principal del estudio es la cuantificación y evaluación de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de dos edificaciones multifamiliares tradicionales en la ciudad de Lima, Perú.

PLAN DE TRABAJO

Para desarrollar la investigación, se seguirá la siguiente secuencia:

1. Revisión literaria sobre la herramienta de ACV y el estado del arte de las investigaciones relacionada con la aplicación de ACV en el sector infraestructura y edificaciones.
2. Selección de dos proyectos de edificaciones multifamiliares en la ciudad de Lima.
3. Obtención de la información relevante a los proyectos seleccionados: planos de estructuras, planos de arquitectura, etc.
4. Definición de la frontera del sistema estudiado y la Identificación de los procesos incluidos en el análisis.
5. Desarrollo del inventario de ciclo de vida utilizando la base de dato *ecoinvent* y el *software* SimaPro.
6. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida utilizando la metodología de impactos ambientales TRACI 2.1.
7. Análisis de resultados para ambos proyectos de edificaciones.
8. Comparación de resultados de los modelos con bibliografía pertinente.
9. Conclusiones finales acerca de los modelos utilizados.
10. Elaboración de la tesis.

Adicionalmente, se coordinarán reuniones periódicas con la alumna para verificar el avance de investigación, resolver consultas y dar indicaciones para los avances futuros. La revisión de la tesis de investigación tendrá dos etapas: revisión del primer y segundo borrador.

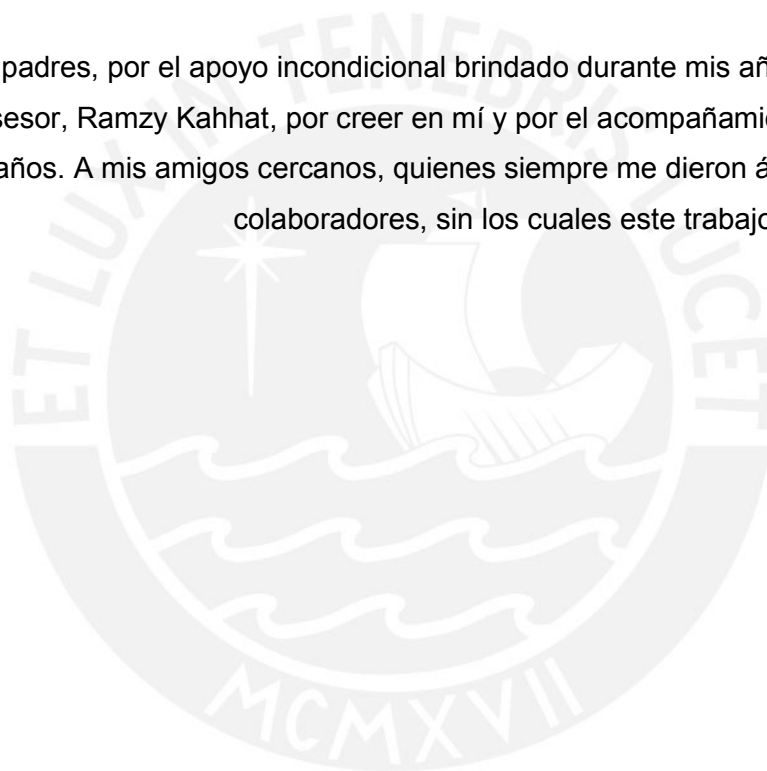
NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



A mis padres, por el apoyo incondicional brindado durante mis años de estudios. A mi asesor, Ramzy Kahhat, por creer en mí y por el acompañamiento en estos dos años. A mis amigos cercanos, quienes siempre me dieron ánimo. A todos los colaboradores, sin los cuales este trabajo no sería posible.

Muchas gracias.



ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL	i
CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE	5
2.1 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO TÉCNICA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL	5
2.2 EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN EL PERÚ	7
2.3 EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA EDIFICACIONES	9
CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA	14
3.1 DEFINICIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE ACUERDO A LA NORMATIVA ISO	14
3.2 LA UTILIZACIÓN DE SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE ACV	17
3.3 PASOS A SEGUIR EN LA INVESTIGACIÓN	18
3.4 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS A SER ESTUDIADOS	26
3.4.1 MODELO 1	28
3.4.2 MODELO 2	29
3.4.3 LÍMITES GEOGRÁFICOS Y TEMPORALES DEL SISTEMA	30
3.5 MATRIZ ENERGÉTICA PERUANA	32
3.6 INDICADOR DE ENERGÍA PRIMARIA CONSUMIDA – “CUMULATIVE ENERGY DEMAND”	34
3.7 METODOLOGÍA TRACI 2.1	34
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	39
4.1 ENERGÍA PRIMARIA CONSUMIDA	39
4.1.1 CICLO DE VIDA MODELO 1	39
4.1.2 CICLO DE VIDA MODELO 2	40
4.2 INDICADORES INTERMEDIOS TRACI 2.1	41
4.2.1 INDICADORES TRACI 2.1 MODELO 1	42
4.2.2 INDICADORES TRACI 2.1 MODELO 2	43

CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	46
5.1 COMPARACIÓN POR METRO CUADRADO DE VIVIENDA	46
5.2 COMPARACIÓN POR UNIDAD DE VIVIENDA	53
CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	58



CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

La construcción es una actividad económica intensiva en el uso de energía y materia prima. El inicio del Siglo XXI para el Perú se tradujo en un crecimiento económico próspero. El sector construcción ha sido uno de los beneficiarios de este crecimiento económico en el país. A la par en el sector construcción se ha dado el “Boom Inmobiliario”. Promovido por las grandes constructoras, inmobiliarias y por el mismo estado peruano, el “Boom” ha sido responsable de la construcción de edificaciones de vivienda multifamiliares en toda la ciudad de Lima y las grandes capitales del país.

Al cierre del año 2013, el sector construcción en el Perú representaba el 6.9% del PBI a nivel nacional (INEI 2016). Además, el sector construcción creció 8.6% el 2013 (INEI 2016) y el 2012 tuvo un crecimiento del 15.2% (INEI 2016). Aun cuando se aprecia una desaceleración en el sector debido a los reajustes del sistema financiero, la construcción sigue creciendo y los impactos ambientales que tiene van a la par en aumento.

Asimismo, el crecimiento del sector construcción representa el aumento en el consumo de los materiales de construcción. Por ejemplo, eligiendo al cemento como materia prima esencial para la construcción de edificaciones de viviendas multifamiliares en la ciudad de Lima, se podría apreciar el gran impacto al medio ambiente que se tiene. La producción de cemento entre el año 2006 y el 2012 creció un 73% alcanzando las 10 millones de toneladas producidas (INEI 2016). La actividad productiva del cemento es intensiva en el uso de energía, 107 kWh por tonelada de cemento producido (FICEM 2013), debido a la utilización de hornos que alcanzan temperaturas de 1450 °C (FICEM 2016). Por ello, resulta de gran importancia analizar los posibles impactos ambientales que tiene la construcción de edificaciones en la ciudad de Lima y a nivel nacional por la gran expansión del mercado inmobiliario que se ha dado.

Para la presente investigación e investigaciones futuras, no solo se deberían considerar los impactos relacionados a la etapa de construcción de la vivienda, si no el ciclo de vida completo de la edificación. Una visión holística es necesaria para poder comprender la magnitud del impacto que se está generando. Por ejemplo, si solo se considera la etapa de construcción, sin considerar la producción de los materiales utilizados en la misma, se tendrían resultados con grandes limitaciones que no reflejarían el impacto real. En los siguientes capítulos se explicará la perspectiva del ciclo de vida y las etapas consideradas en la presente investigación.

Además, es importante analizar el patrón de consumo energético por sectores económicos en el Perú. En las figuras 1.1 y 1.2, presentadas a continuación, se observa que el sector residencial, comercial y público representa un 28% en consumo de energía primaria y un 44% en consumo eléctrico (MINEM 2014). Estas cifras demuestran la relevancia del sector y la necesidad de desarrollar investigaciones en este ámbito.

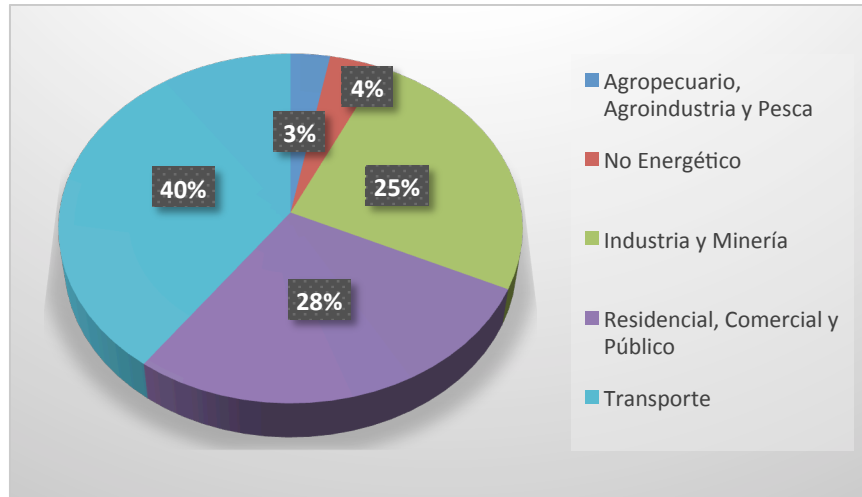


Figura 1.1 Estructura del consumo final de energía por sectores económicos (2012)
Fuente: Adaptado del Ministerio de Energía y Minas 2014

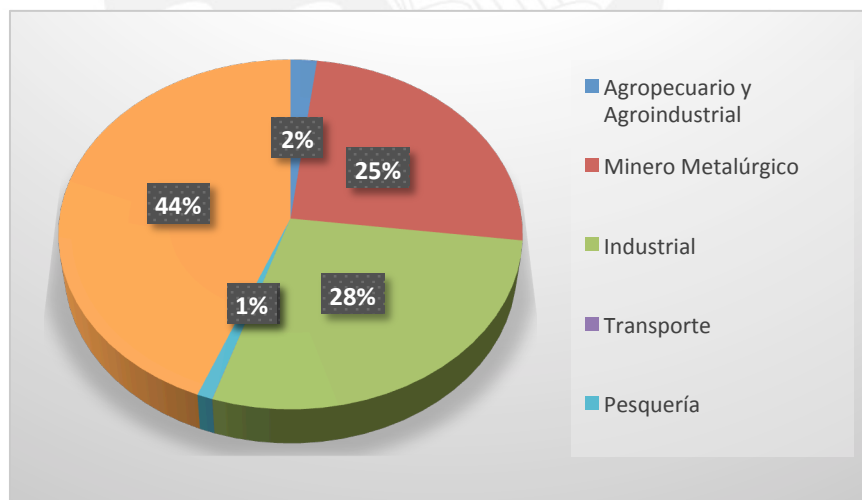


Figura 1.2 Estructura del consumo final de electricidad por sectores económicos (2012)
Fuente: Adaptado del Ministerio de Energía y Minas 2014

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es la cuantificación y evaluación de los impactos ambientales en el ciclo de vida de edificaciones multifamiliares en la ciudad de Lima, Perú. Se busca desarrollar un análisis de dichos impactos para dos edificaciones de manera que se pueda determinar cuál tipo posee un comportamiento ambiental más favorable. En la figura 1.1 se observa la ubicación de la ciudad de Lima en el mapa del Perú.



Figura 1.3 Mapa del Perú

Fuente: Adaptado de Google Maps 2016

Las edificaciones con las que se trabaja son típicas de viviendas multifamiliares en las que varía el tipo estructural y el área de las unidades de vivienda contenidas. La primera edificación seleccionada es del tipo estructural de ductilidad limitada con 8 pisos de altura; la cual será referida como **modelo 1**. La segunda edificación es dual aporcionada, cuenta con 5 pisos de altura, y será referida como **modelo 2**.

El modelo 1 se encuentra ubicado en el distrito de Santiago de Surco mientras que el modelo 2 se encuentra en el distrito de San Isidro. Ambos distritos son cercanos,

como se puede apreciar en la figura 1.2. La tecnología de construcción y los materiales son los mismos para ambos modelos.

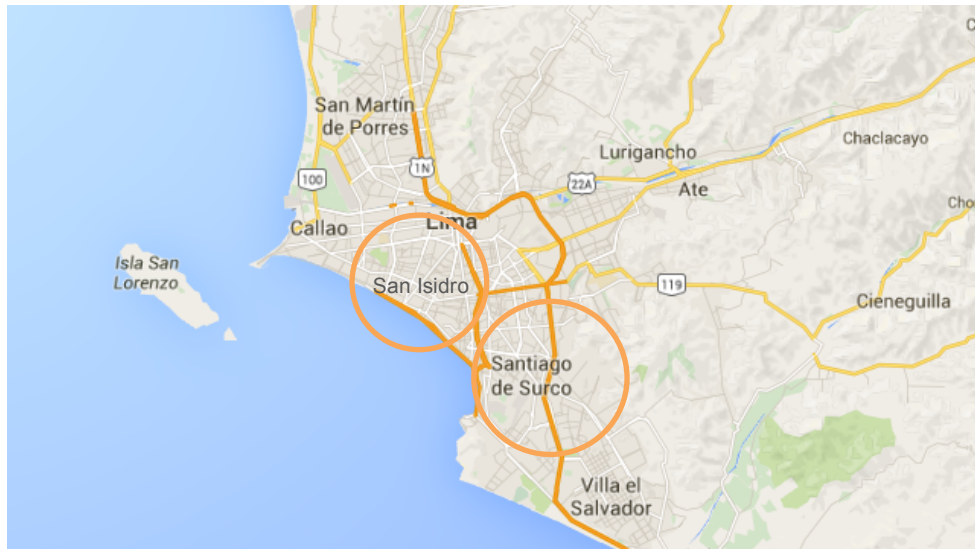


Figura 1.4 Mapa de la ciudad de Lima
Fuente: Adaptado de Google Maps 2016

Los objetivos específicos son:

- Análisis, cuantificación y comparación del consumo primaria de energía de las edificaciones multifamiliares de diferentes tipos a lo largo de su ciclo de vida.
- Análisis, cuantificación y comparación para 1 m² de vivienda construida de los impactos asociados a las categorías del método elegido TRACI 2.1.
- Identificación de las etapas del ciclo de vida que tengan mayores impactos y comparación con modelos típicos desarrollados en E.E.U.U.

A continuación, en el capítulo 2 se presentará el estado del arte de los Análisis de Ciclo de Vida en general, y específicamente para el sector de edificaciones. En el capítulo 3 se definirá el ACV de acuerdo a la normativa ISO, se definirán los sistemas a ser analizados, se expondrá la metodología de trabajo con el software SimaPro, el método TRACI 2.1 y sus indicadores. En el capítulo 4 se presentarán los resultados del estudio. En los capítulos 5 se dará la comparación y discusión de los resultados. Finalmente, en el capítulo 6 se trabajarán las conclusiones en función a lo obtenido en los sistemas mencionados.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que ha sido difundida en los últimos años en el mundo de la ingeniería y el desarrollo sostenible. Actualmente, se encuentra normado bajo los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 plantean la definición y lineamientos básicos para el desarrollo de un ACV. Esta herramienta ha evolucionado a lo largo de los últimos años con el propósito de ser una herramienta útil para poder determinar impactos ambientales, descubrir mejores alternativas para productos distintos y promover el desarrollo sostenible. Hoy en día, existen diversos softwares para el desarrollo de los ACV: por ejemplo SimaPro, Gabi, y Athena, entre otros; que facilitan el uso de grandes bases de datos desarrolladas por terceros como EcolInvent.

En este capítulo se presentará la historia de los ACV, la aplicación de los mismos en el sector construcción de inmuebles a nivel mundial, en el Perú, y la utilización de software para su desarrollo.

2.1 EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO TÉCNICA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

El ACV es una técnica relativamente reciente cuya utilización ha comenzado a ser difundida a partir de la década de 1990. Los estudios precursores al ACV datan de los años sesenta. En un inicio las preocupaciones se encontraban dirigidas a la eficiencia energética. Es por eso que en 1963, en la Conferencia Mundial de la Energía se presentó el primer estudio de la energía necesaria para la fabricación de químicos (EPA 2006). Por otro lado, en 1969 el Midwest Research Institute (MRI) elaboró por encargo de la compañía Coca-Cola un estudio pionero en el que se contemplaban los recursos utilizados, la energía y el uso de combustibles fósiles para la fabricación de diferentes tipos de envases para bebidas gasificadas (Curran 2012). Lamentablemente, este estudio nunca llegó a ser publicado. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA 2006) el estudio de la Coca-Cola fue desarrollado con información gubernamental debido a que no se contaba con la información industrial pertinente en ese entonces.

Durante las décadas de los sesenta y setenta, con la crisis del petróleo, comienza a surgir un interés por el cuidado de los recursos y el consumo energético. Por ello, el MRI adopta la metodología llamada REPA (Resource and Environmental Profile

Analysis) en la que se consideraban los recursos y las salidas de los productos a ser analizados desde la cuna hasta la tumba (Curran 2012).

A partir de la década de los 80, con la crisis del petróleo dejada en la década anterior, la eficiencia energética pasó a un segundo plano y la preocupación se centró en el manejo de los residuos sólidos. Bajo estas preocupaciones el Consejo Presidencial de Calidad Ambiental ordenó al MRI desarrollar distintos REPA. En 1988, los residuos sólidos se convirtieron en un problema de preocupación global (EPA 2006), lo que llevó a mejorar las metodologías para el ACV.

El término “Life Cycle Assessment” (LCA o ACV por sus siglas en español), fue presentado por primera vez en el taller de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) en 1990 (Curran 2012). Con la preocupación creciente del uso inadecuado de las metodologías para el marketing de productos surge la necesidad de lograr un estándar para estas. Por ello, entre 1997 y el 2002 se desarrollaron las bases de la línea de estándares ISO 14000, el cual será explicado posteriormente en el capítulo de metodología.

Además, en el año 2001 se creó el Centro Americano para la Evaluación del Ciclo de Vida, para la promoción del uso del ACV como técnica de evaluación ambiental. Entre el 2002 y el 2006 el ACV ha sido difundido por el mundo con la creación de sociedades a nivel regional como la ALCA (Sociedad de Ciclo de Vida Australiana), la ISLCA (Sociedad India para el ACV), entre otras.

En el 2002 se lanzó la “Iniciativa Global de Ciclo de Vida” en la que la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas) y la SETAC unieron fuerzas (Curran 2012). Esta iniciativa, actualmente en su tercera fase, busca promover el pensamiento del ciclo de vida y su práctica eficiente. Asimismo, responde al plan de 10 años para el desarrollo sostenible de acuerdo a los lineamientos del “World Summit on Sustainable Development” (WSSD) y al plan de Johannesburgo 2002 (Curran 2012).

Hoy en día, aún queda mucha información por definir para el desarrollo de los ACV, pero su presencia en el mundo ingenieril y del desarrollo sostenible es cada vez más importante. Los resultados que se obtienen de los estudios de ACV colaboran en el desarrollo de lineamientos de políticas públicas con el fin de lograr un desarrollo más sustentable. Estos resultados proporcionan información de gran utilidad dado que se logran identificar los procesos más críticos en el ciclo de vida y concentrarse su mejora desde distintos puntos de vista, como la eficiencia

energética, la disminución de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, entre otras.

2.2 EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL PERÚ

A partir del año 2008, se fundó el Ministerio de Medio Ambiente en el Perú con el fin de garantizar el cumplimiento de la Ley General del Ambiente N° 28611. Desde este organismo se realiza la gestión ambiental y se plantean las exigencias para el desarrollo de los estándares ambientales, estudios de impacto ambiental, entre otros. Lamentablemente, aun en el Perú no existe una gran difusión del tema ambiental y una gran preocupación por el cuidado del medio ambiente. El desarrollo de estudios de ACV es limitado.

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) dirige la Red Peruana de Ciclo de Vida (RPCV). Esta organización se encarga de desarrollar investigaciones de ACV en diferentes rubros para el beneficio del Perú. La institución nace a partir de la Iniciativa del Ciclo de Vida de la UNEP con la SETAC en el año 2005. La RPCV provee servicios de consultoría y desarrollo de ACV para terceros, además de buscar difundir el uso de la técnica para el desarrollo sostenible. Debido a que el acceso y calidad de la información en el Perú es limitado y deficiente, la RPCV, busca la formación de bases de datos de inventario en el Perú a través de los trabajos de investigación (RPCV 2016).

La RPCV ha desarrollada una serie de proyectos en diferentes rubros, entre los cuales se encuentran: inventario de ciclo de vida de la minería artesanal de oro, inventario de ciclo de vida de las llantas, análisis de ciclo de vida de los biocombustibles de palma aceitera y *Jatropha Curcas*, análisis de ciclo de vida de los biocombustibles en el Perú, inventario de ciclo de vida de una hidroeléctrica, análisis de ciclo de vida de las energías renovables, y análisis de ciclo de vida de los transformadores. Actualmente, la institución se encuentra desarrollando una serie de proyectos de análisis de ciclo de vida entre los cuales se encuentran ECOISCO, ECOAGRO, Proyecto Boca Manu y Proyecto Pescaenverde Perú (RPCV 2016).

El proyecto ECOISCO se concentra en realizar el análisis de ciclo de vida de la producción de la bebida espirituosa bandera peruana: Pisco. Actualmente se encuentra en etapa de resultados con proyección a la publicación de diversos artículos científicos.

Por otro lado, el proyecto ECOAGRO se desarrolla para la empresa Valle y Pampa, y el año 2015 fue ganador del “12 Premio Perú 2021 a la Responsabilidad Social y Desarrollo Sostenible de las Empresas”. Este proyecto desarrolla el análisis de ciclo de vida de diversos cultivos de la empresa cuyo rubro es la agricultura: arándano, espárrago y granado (RPCV 2016).

El proyecto Boca Manu busca determinar los impactos ambientales debido a la construcción de una carretera en una zona aledaña al Parque Nacional del Manu (RPCV 2016).

Por último, el proyecto Pescaenverde Perú es una adaptación de la tesis doctoral de Ian Vázquez-Rowe a la realidad peruana con de calcular las emisiones de gases de efecto invernadero y el retorno energético asociados al sector pesquero en el Perú (RPCV 2016).

Adicionalmente, se cuenta con la tesis para título profesional de Ingeniería Civil de la ingeniera García Torres de la PUCP. En este trabajo de tesis se desarrolló el estudio de “Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar”, el cual consistía en el desarrollo de un ACV de una vivienda unifamiliar del sector socioeconómico A utilizando el software Athena (García Torres 2014). Este estudio reflejó la importancia de la etapa del uso de la vivienda en el consumo energético sobre la etapa de construcción, aun así en contraste con estudios realizados en E.E.U.U. se descubrió que la etapa de construcción tenía mayor relevancia en general. A continuación, se presentan en la figura 2.1 los porcentajes de impacto del estudio.

Tabla 2.1 Porcentaje de impacto ambiental por indicador para una vivienda unifamiliar en Lima.

Rubro	Etapa del Ciclo de Vida		
	Pre-uso	Uso	Fin de vida
Energía	42.3%	55.2%	2.6%
Potencial de calentamiento global	58.4%	38.3%	3.3%
Desechos o emisiones al suelo	94.7%	5.0%	0.2%
Criterio de salud humana	69.5%	29.7%	0.8%

Fuente: Adaptado de García Torres 2014

2.3 EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EDIFICACIONES

Los ACV para edificaciones han sido, en su mayoría, realizados fuera del Perú. La tesis de grado de García Torres es pionera en el campo de las edificaciones de vivienda a nivel nacional. La mayor cantidad de estudios han sido conducidos en los Estados Unidos. Según la EPA las edificaciones tanto comerciales como residenciales representan el 38.9% de las emisiones de CO₂ para su país (EPA 2009). Las edificaciones residenciales representan el 20.8% según la misma fuente.

La realización de un ACV de una edificación residencial se puede dividir en dos importantes momentos: la construcción de la edificación, y la fase de operación (Erlandsson y Borg 2003: 992). La fase de construcción incluye la extracción de las materias primas para la misma y el transporte a la obra, además de la construcción in situ. Por otro lado, la operación incluye el uso de electricidad de todos los aparatos, el uso de agua y el mantenimiento de la edificación.

Para el sector construcción, existe el estándar ASTM E1991-05 (ASTM International 1991) en el que se norma el procedimiento para el desarrollo de los análisis de ciclo de vida de materiales de construcción y sus productos. La importancia de los ACV en la construcción de edificaciones hace "... posible la evaluación de la influencia que tienen las decisiones iniciales relacionadas con el mantenimiento y los costos operacionales en la fase de diseño sobre el impacto ambiental real del edificio" (Traducción propia, Zabalza et al. 2009). Hoy en día, poder cuantificar los impactos que tienen las edificaciones en el medio ambiente es vital para el futuro desarrollo sostenible de la sociedad.

Un primer estudio, que contemplaba la visión de ciclo de vida, fue realizado por Keolian, Blanchard y Reppe en el año 2000. Este se basaba en el consumo energético, los costos, y las posibles estrategias de mejora para viviendas en Estados Unidos. Se contemplaron las fases de producción de materiales, construcción, operación y mantenimiento, y demolición de la vivienda estándar de 228 m². Se compararon estrategias de ahorro energético y se definieron dos viviendas: Vivienda Estándar (VE) y Vivienda Energéticamente Eficiente (VEE). Algunas estrategias usadas en la VEE incluyeron mayor aislamiento de las paredes y techos, reducción de las infiltraciones de aire, electrodomésticos energéticamente eficientes, uso de luces fluorescentes, recuperación del agua caliente residual, entre otras.

En la fase de operación y mantenimiento se incluyó la utilización de gas natural para la calefacción de la vivienda, el uso de electricidad para el aire acondicionado

y demás artefactos, y todas las actividades relacionadas con la mejora y mantenimiento de la vivienda. Todos los materiales que fueron reemplazados en la mejora y mantenimiento tuvieron las mismas intensidades energéticas que los utilizados en la construcción de la vivienda. Para la demolición se contempló la energía real de la demolición en sí y el transporte de los residuos a rellenos sanitarios o para ser reciclados. Además se realizó un análisis de masa a lo largo del ciclo de vida en forma comparativa para la VE y la VEE.

Los resultados del estudio de Keolian, Blanchard y Reppe demostraron que existen grandes oportunidades para reducir drásticamente el consumo energético de las viviendas. La VEE logró una reducción del 60% de la energía en el ciclo de vida. El consumo de la VE fue de 16,000 GJ mientras que la VEE tuvo un consumo de 6,400 GJ. La fase de uso para la VE representó el 91% de la energía consumida. Por otro lado, la fase de uso para VEE representó un 74% de la energía. Las estrategias para ahorro energético representaron la disminución de la importancia de la fase de uso para la VEE. Por otro lado, el potencial de calentamiento global fue reducido en 63% entre la VE y la VEE. El concreto, la madera, la grava, y el acero son los mayores contribuyentes al potencial de calentamiento global. El costo de la VEE se recupera en 50 años por lo que la ventaja económica de la VEE sobre la VE es despreciable.

En conclusión, los autores mencionan la importancia del análisis de ciclo de vida como guía para la mejora de las viviendas. Además, se pueden lograr cambios en los patrones de consumo si se adoptan políticas apropiadas acerca del uso de los suelos, la energía y el consumo de materiales.

Por otro lado, el estudio realizado por Ochoa et al. (2002) estimó los recursos necesarios, electricidad y energía utilizadas, residuos peligrosos generados, emisiones tóxicas, para la construcción de viviendas típicas en Estados Unidos; el uso de las mismas y su demolición en el año 1997. A través del análisis económico de insumo-producto se estimaron los impactos del ciclo de vida del sector residencial (“Economic Input-Output Life-cycle Assessment” – EIOLCA).

Los resultados del estudio demostraron que el consumo eléctrico, la energía primaria consumida, y la emisión de gases de efecto invernadero representan el 95%, 93% y 92%, respectivamente, del ciclo de vida de las viviendas. Al igual que Keolian, Blanchard y Reppe (2000), se sugiere que se puede reducir significativamente estos impactos a través del rediseño. Por otro lado, la fase de

construcción es atribuida con el 57% de las emisiones tóxicas al aire y el 51% de residuos peligrosos (Ochoa et al. 2002).

Junnila y Horvath publicaron en el 2003 un estudio en el que se contemplan los efectos ambientales del ciclo de vida de un edificio de oficinas. Para el tiempo de vida de una edificación de oficinas de 50 años se estimaron los impactos ambientales potenciales y los elementos más críticos durante la vida de la edificación. Los resultados obtenidos reflejaban la importancia de la fase de uso: 65-75% del impacto (Junnila y Horvath, 2003). Se considera que se tienen grandes limitaciones para poder generalizar los resultados del estudio debido a que no se cuenta con mayor literatura sobre el tema.

En el estudio realizado por Kahhat et al. 2009, se analizaron los impactos para una edificación residencial de un piso al usar diferentes sistemas de muros exteriores en Phoenix, Arizona. Se compararon seis viviendas de 200 m² considerando una vida útil de 50 años. Los sistemas de muros elegidos fueron: (1) bloques de concreto, (2) concreto premezclado vaciado in-situ, (3) concreto aislado, (4) marcos de madera tradicionales de 0.05 m x 0.1 m por 0.4 m, (5) marcos de madera tradicionales de 0.05 m x 0.1 m por 0.6 m, y (6) marcos de acero. Para el análisis de la energía operacional se usó el software eQUEST en el que se incluyeron la geometría y propiedades estructurales de la vivienda. Por otro lado, se usó el software ATHENA para el desarrollo del ACV completo y la cuantificación de los impactos ambientales más importantes.

Los resultados demostraron que para la fase de pre-uso los muros aislados de concreto (3) fueron los más intensivos energéticamente: 739 GJ versus 635 GJ para el pre-uso de los muros tradicionales de marco de madera (5). En contraste, para el total de la energía consumida los mismos muros aislados (3) representaron un ahorro energético del 5% sobre los tradicionales de madera (5) (Kahhat et al., 2009). Nuevamente, la fase de uso representó en promedio un 94% de toda la energía consumida en el ciclo de vida de las edificaciones de vivienda en mención. El fin de vida de la vivienda es hasta cierto punto despreciable en comparación con la importancia de las demás etapas.

Además, para el caso de Phoenix la masa térmica de los muros exteriores tiene un papel importante en la reducción de la energía consumida en el ciclo de vida de la edificación. Finalmente, la fase de pre-uso no debe de ser subestimada aun cuando la fase de uso representa la mayor parte de la energía consumida (Kahhat et al., 2009).

Dentro de la literatura encontrada, resalta el estudio de la Unidad Funcional, dinámica tecnológica y escalamiento de la energía de ciclo de vida de los edificios residenciales, desarrollado por Frijia, Guhathakurta y Williams (2012). El estudio se centra en la fase de uso debido a su mayor relevancia en consumo energético para las edificaciones de vivienda en los Estados Unidos. Por ello, se busca a través de la modificación de la unidad funcional: unidad básica de análisis, por ejemplo departamento o m² de vivienda en 50 años de uso; ver la real contribución de los materiales y la construcción al impacto del ciclo de vida. Para ello, se asume que los equipos utilizados para el calentamiento y enfriamiento de las viviendas son reemplazados a lo largo del ciclo de vida y debido a los avances tecnológicos son más eficientes energéticamente. Con la redefinición mencionada se encuentra que se puede atribuir de 19% a 30% de la energía primaria a los materiales y los procesos de construcción mientras que en otros estudios este valor es mucho menor representando 0.4-11% de la energía. Además, se sugiere que la energía gastada en las unidades residenciales aumenta linealmente al aumentar su área. Se sugiere entonces que para unidades de vivienda de un piso, por cada pie cuadrado más de espacio habitable se aumenta la energía en 419 MJ, y para unidades de vivienda de dos pisos 360 MJ por pie cuadrado adicional (Frijia, Guhathakurta y Williams 2012).

Recientemente, Bawden y Williams publicaron un estudio que contempla el ACV híbrido (metodología que combina dos tipos de realización de los estudios de ACV) de edificaciones de vivienda de densidad baja, media y alta (2015). Los impactos estimados en el estudio incluyen la demanda de energía primaria y el potencial de calentamiento global para 10 edificaciones en los Estados Unidos. En esta investigación se hace hincapié en el tema de la unidad funcional (unidad de análisis del ACV). Para la energía considerada en el uso de la vivienda no se considera el mantenimiento y se considera principalmente la energía asociada al sistema de calefacción y aire acondicionado mas no a los electrodomésticos, luces y electrónicos. Los edificios analizados varían en altura desde tres pisos hasta veintiún pisos. Los sistemas de muros exteriores varían desde paneles de madera, paneles de concreto prefabricado, y concreto reforzado prefabricado. Los sistemas estructurales varían entre madera, concreto armado y acero. Al incluir solamente el sistema de calefacción y aire acondicionado en la fase de operación la importancia de la fase de pre-uso aumenta del 13% al 26% (Bawden y Williams, 2015) para la edificación de once pisos. Esto refuerza la idea de que la operación es la fase más

significativa debido a los sistemas de aire acondicionado y calefacción, pero de igual forma no se debe dejar de lado la fase de pre-uso.

Se puede observar que las edificaciones de densidad baja, media y alta tienen un consumo primario de energía de 30, 34 y 39 GJ/m² respectivamente (Bawden y Williams, 2015). Este aumento se puede atribuir a la intensidad energética de los materiales estructurales para las edificaciones de mayor densidad. El potencial de calentamiento global va desde 1.8 tCO₂ eq/m² para edificaciones de densidad baja a 2.5 tCO₂ eq/m² para edificaciones de densidad alta.

Finalmente, es importante resaltar que las necesidades de un edificio residencial en este país no serán las mismas que para el Perú. Los edificios residenciales en E.E.U.U. son sometidos a temperaturas extremas y se acostumbra la utilización de aire acondicionado y calefacción para las temporadas más calientes y más frías respectivamente. En el presente estudio, localizado en la ciudad de Lima, el uso de aire acondicionado y calefacción no aplica a las edificaciones residenciales por lo que se espera un comportamiento distinto en los patrones de consumo energético. La temperatura de la ciudad de Lima oscila entre un máximo de 28°C en verano y 14°C en invierno (SENAHMI 2011a & SENAHMI 2011b).



CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA

El presente trabajo de tesis surge de la necesidad de generar información acerca de los impactos ambientales producidos por los distintos sectores económicos en el Perú a través del uso de metodologías como el ACV. El presente estudio busca analizar el sector de edificaciones de vivienda en la ciudad de Lima. Este capítulo procede a explicar la metodología aplicada para la realización del proyecto.

3.1 DEFINICIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE ACUERDO A LA NORMATIVA ISO

El ACV es una herramienta, utilizada para evaluar los aspectos ambientales y energéticos de un producto o servicio. Permite cuantificar y caracterizar los impactos ambientales relacionados con cualquier tipo de producto, desde una bolsa de papel hasta edificios de viviendas multifamiliares como en el presente estudio.

De acuerdo a la norma ISO 14040:2006, el ciclo de vida de un producto consta de una serie de etapas consecutivas y conectadas dentro de un sistema, desde la extracción de la materia prima hasta su eliminación. El ACV se define como la compilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales del sistema de un producto a lo largo de su ciclo de vida.

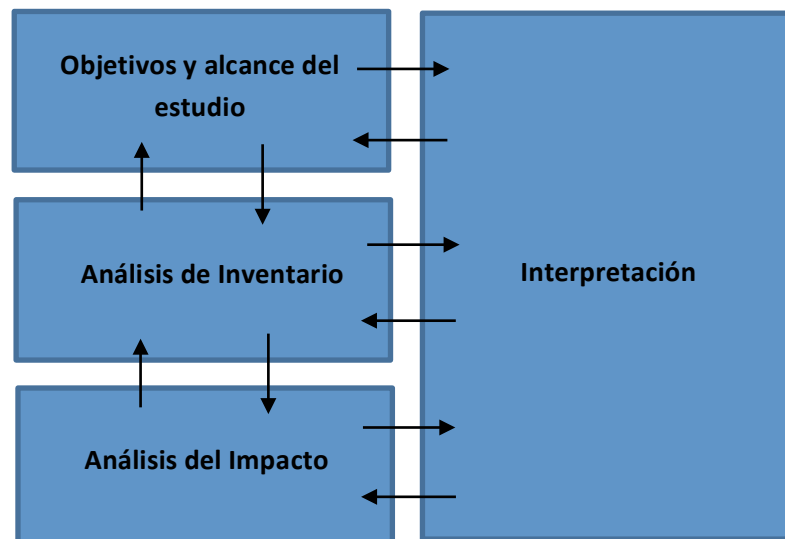


Figura 3.1 Etapas del ACV

Fuente: Adaptado de la normativa ISO 14040:2006

Como se puede observar en el esquema de la figura 1.1, el desarrollo del análisis consta de cuatro etapas principales: objetivos y alcance del estudio, análisis del

inventario, análisis de los impactos, e interpretación. A continuación, se explica detalladamente cada una de las etapas mencionadas.

a) **Objetivos y alcance del estudio**

El objetivo de un ACV incluye: la aplicación del estudio, las razones y función de su desarrollo, y la intención de los resultados a ser obtenidos.

Además, se debe definir la unidad funcional o unidad de análisis del sistema, y sus límites. De acuerdo con el estándar ISO 14040, la unidad funcional es “la performance cuantificada de un sistema de producto, para ser usada como unidad de referencia” (ISO 14040:2006). Los límites del sistema definen los procesos unitarios incluidos y los que se omiten.

Por otro lado, el alcance del estudio debe dejar en claro la metodología a ser utilizada, las categorías de impacto definidas a través de los indicadores conocidos, las limitaciones y la información utilizada para su desarrollo.

b) **Inventario del ciclo de vida**

El inventario del ciclo de vida del producto es la recolección de la información de las entradas y salidas (insumos y productos) del sistema. En esta etapa se pueden definir dos sub-etapas: la recolección de la data y los cálculos desarrollados con la misma.

Recolección: Es importante recolectar la información adecuada acerca de las entradas al sistema en función de energía, materia prima, entre otros. Además, se deben identificar los productos, co-productos si existieran, y residuos del sistema, además de las emisiones al aire, contaminación del agua y suelo y cualquier otro aspecto ambiental importante.

Cálculo: En esta fase se relaciona la data, se identifican los procesos unitarios y se construyen los inventarios.

c) **Evaluación del impacto del ciclo de vida**

De acuerdo a la norma ISO 14040:2006 vigente, en los lineamientos del desarrollo de un ACV, existen elementos obligatorios y opcionales para el análisis de los impactos. En la figura 1.2 se aprecian los elementos obligatorios para el desarrollo del análisis de los impactos.

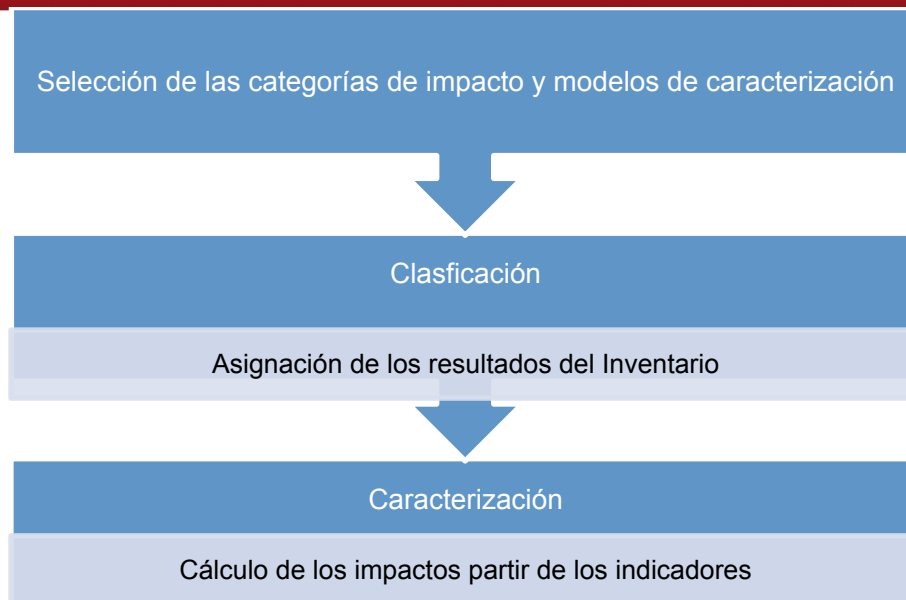


Figura 3.2 Elementos obligatorios para el análisis de los impactos

Como se observa en la figura 3.2 estas etapas incluyen la selección de las categorías de impacto, la clasificación del inventario del ciclo de vida de acuerdo a dichas categorías y finalmente el cálculo de los impactos (caracterización) para su posterior interpretación. Para la selección de las categorías de impacto se utilizan distintas metodologías de análisis que serán presentadas en las secciones 3.3 y 3.4 del presente capítulo.

d) Interpretación

En esta última etapa del ACV se busca, como su nombre lo dice, interpretar los objetivos y alcances originalmente planteados en relación a los resultados obtenidos de los inventarios desarrollados en las etapas mencionadas con el fin de establecer las conclusiones pertinentes. Esta etapa debe de ser consistente con la primera etapa y proveer resultados que respondan a los objetivos y alcances que se plantearon inicialmente.

La interpretación debe:

- a) Identificar problemas significativos
- b) Evaluar la consistencia y la complejidad de los resultados
- c) Proveer conclusiones, limitaciones y recomendaciones futuras

A continuación, se presentarán los sistemas que serán evaluados con la herramienta del ACV en este estudio.

3.2 LA UTILIZACIÓN DE SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE ACV

Existen varias metodologías para el desarrollo de un ACV. Entre estas podemos encontrar la metodología de suma de procesos (Process-Sum) y la metodología de insumo – producto (EIO – Economic Input Output). La metodología de suma de procesos, que como su nombre lo indica involucra la suma de todos los ingresos de un producto, es la comúnmente utilizada por los diferentes softwares existentes y la que ha sido utilizada en el presente estudio.

A continuación, se dará una breve explicación de algunos de los softwares de mayor difusión para llevar a cabo un ACV del tipo de suma de procesos, los cuales fueron considerados para el desarrollo de la presente investigación. Los tres softwares a ser mencionados son: SimaPro, Gabi, y Athena. Este tipo de softwares trabaja con grandes bases de datos, las que son producto de investigaciones extensas en los diferentes rubros. Vale la pena resaltar que el software Athena se usa especialmente para construcciones, mientras que SimaPro y Gabi pueden ser utilizados para modelar cualquier tipo de producto desde una botella de plástico hasta una edificación.

Gabi es un software desarrollado por Thinkstep. Thinkstep es una compañía alemana dedicada al desarrollo de software y consultoría en sostenibilidad, originalmente basada en la Universidad de Stuttgart y llamada PE International. El software Gabi sirve para el desarrollo de los ACV a través del modelamiento de los elementos de un sistema de producto diseñado para la toma de decisiones de manufactura de cualquier tipo de producto (Gabi 2014). Gabi cuenta con su propia base de datos la cual se actualiza cada año y a su vez permite trabajar con otras bases de datos del mercado. Este programa se basa principalmente en escenarios europeos. La base de datos propia cuenta con 4700 Inventarios de Ciclo de Vida entre los cuales se pueden encontrar procesos de energía, transporte, materiales de construcción, iluminación LED, entre otros. Además, permite modelar los escenarios de disposición de residuos, y determinar la huella de carbono y el balance de carbono.

Por otro lado, SimaPro es un software para el desarrollo de ACV a través del modelamiento de procesos unitarios, desarrollado por la compañía holandesa de consultoría Pré Consultants. Este software actualmente se encuentra presente en

más de 80 países, e incluye un gran número de bases de datos, incluyendo la más difundida Ecolnvent V3 (Pré Consultants 2016). SimaPro permite modelar al igual que Gabi, los procesos y los escenarios de disposición, y además, trabajar con distintos indicadores ambientales. Pré Consultants además forma parte del equipo desarrollador de la metodología para cálculo de impactos ReCiPe.

Finalmente, el Instituto de Materiales Sostenibles Athena, ha desarrollado su software para ACVs que calcula los impactos en el medio ambiente de las construcciones de acuerdo a su región geográfica (Athena Sustainable Materials Institute 2016). Este software permite al usuario contemplar los distintos escenarios en los cuales podría verse involucrado desde la etapa de diseño hasta el fin de vida de la edificación. Athena limita sus escenarios para el modelado a los Estados Unidos de América, pero cuenta con una interfaz simple para que el usuario pueda realizar el análisis.

En el presente trabajo se ha decidido trabajar con el software SimaPro 8.0.5.13 (PréConsultants 2015a), por su facilidad de uso, la posibilidad de trabajar con la base de datos de Ecolnvent V3, y el acceso a una licencia educacional. Además, la RPCV desarrolla los proyectos con este software por lo que se pudo conseguir apoyo que facilitó el aprendizaje de la utilización del software.

3.3 PASOS A SEGUIR EN LA INVESTIGACIÓN

Para realizar la investigación y el desarrollo del análisis del ciclo de vida, se deben desarrollar una serie de pasos los cuales dan como resultado el trabajo final de tesis. El trabajo se realizó de la siguiente manera:

a) Revisión de la literatura y selección del programa

En un primer momento se llevó a cabo la revisión de la literatura existente de la herramienta de ACV. Se buscó información de su origen, su difusión, los estudios desarrollados a nivel mundial, entre otros. Además, se investigó sobre la aplicación de los ACV en el caso de viviendas tanto unifamiliares como multifamiliares.

Se consideró la utilización de diferentes softwares como herramienta de apoyo en el desarrollo del ACV. Finalmente se decidió por la utilización del software SimaPro 8.0.5.13, la base de datos de Ecolnvent V3 y las metodologías de caracterización que permite, como ha sido explicado en la sección anterior.

b) Selección de las edificaciones a ser estudiadas

Lima es una ciudad sísmica. Por ello, las construcciones de concreto armado son muy populares. El primer sistema estructural típico elegido es el denominado ductilidad limitada. Este tipo de edificios se empezó a construir en el Perú a partir del año 2001 y se volvió popular rápidamente por su facilidad de construcción y ahorro de materiales. Estos edificios cuentan con muros de 10 centímetros de espesor lo que permite ahorrar concreto en las estructuras. Por otro lado, el segundo sistema estructural cuenta con placas y pórticos de concreto armado. Esto permite la resistencia y ductilidad de las estructuras frente a los eventos sísmicos. Este sistema estructural es el comúnmente utilizado en la ciudad de Lima. Este tipo de edificaciones se empezaron a construir a partir de la década de 1970, con la publicación de la norma técnica de diseño sismo resistente E.030 (1977), después de los terremotos de los años 1970 y 1974 en el Perú. Los muros son de mayor grosor que en el primer sistema y la cantidad de concreto utilizada es mayor. Se buscó que las edificaciones a modelar representaran la realidad de la construcción en el Perú y sobre todo en la ciudad de Lima.

A partir de la elección de estos dos sistemas estructurales se buscó la información pertinente para el desarrollo de dos modelos en el software SimaPro. Se logró recabar la información de los dos edificios mencionados previamente, los cuales fueron construidos por dos empresas constructoras en la ciudad de Lima. Estos fueron una edificación de 8 pisos de ductilidad limitada y una edificación de 4 pisos de pórticos y placas. Se consiguieron los planos de arquitectura de las edificaciones y los metrados completos, incluyendo los volúmenes de concreto, cantidad de acero, encofrado, el tipo de materiales para los acabados, además el resto de la información necesaria. Se recopiló la información de consumo de electricidad y agua durante la construcción y durante la fase de operación de las viviendas. Las fronteras del sistema incluyen el pre-uso, el uso y el fin de vida de las edificaciones.

c) *Uso del Software SimaPro*

La aplicación del ACV fue desarrollada en el software SimaPro 8.0.5.13 (PréConsultants 2015a) utilizando integralmente la base de datos EcoInvent v3.0. (Weidema et ál. 2013). En esta base de datos se incluyen más de 10,000 procesos y es el producto del trabajo de diversas instituciones suizas, como EMPA Dü, PSI, ETHZ UNS, FAL EMPA SG y ETHZ ICB, para tener al día información integral de inventarios de ciclo de vida (PréConsultants 2013).

Para la utilización de la base de datos es importante entender la información con la que cuenta EcoInvent y como se categoriza. Para ello es importante definir la diferencia entre “allocation” - “consequential” y los procesos unitarios y de sistema.

La gran diferencia entre un set de información de “allocation”, basado en el sistema de atribución, versus el “consequential”, secuencial, está en la escala del ACV. El sistema atribución se basa en los flujos de los procesos para un determinado producto aislado. Por otro lado, el set de información secuencial evalúa las consecuencias ambientales dadas al cambiar la escala de los productos en análisis. En este caso, se están analizando dos edificaciones aisladas por lo que se usará el modelo atribucional de análisis. Si se quisiera analizar el impacto de las edificaciones como un conjunto, por ejemplo, un distrito o una ciudad, se utilizaría el sistema de información secuencial.

Los procesos unitarios y los de sistema presentan los mismos resultados pero debido a la practicidad de uno sobre otro se decide cual tipo de proceso utilizar. Los procesos unitarios contienen solo la información de un proceso en un paso y crean relaciones entre los diferentes procesos incluidos en el producto. Por otro lado, el proceso de sistema considera la información desde el inicio pero no genera relaciones con los demás procesos por lo que se considera como una especie de “caja negra”; no se sabe que información pertenece a cuál proceso. En la siguiente tabla se presentan las principales diferencias entre un proceso unitario y un proceso de sistema.

Tabla 3.1 Diferencias entre procesos unitarios y de sistema

Proceso Unitario	Proceso de Sistema
Árbol de procesos transparente pero extenso, ayuda a comprender los procesos involucrados en el producto	Árbol de procesos simplificado
Contiene alguna incertidumbre, permite correr modelos estadísticos	No hay incertidumbre
Cálculos lentos	Cálculos rápidos

Fuente: Adaptado de PréConsultants 2013

Como se puede observar en la tabla 3.1, los procesos unitarios presentan un árbol de procesos completo. Este árbol permite apreciar a diferentes escalas todos los procesos involucrados en el sistema del producto. En el caso de un proceso de sistema este tipo de información se pierde dado que no se presentan los subprocesos mencionados. Por ello, los procesos unitarios permiten el cálculo de modelos de incertidumbre estadístico mientras que los de sistema no. Al contener mayor cantidad de información los procesos unitarios generan cálculos más lentos pero proveen información más completa. En el estudio se eligió utilizar procesos unitarios.

Además, se cuenta con información modelada para diferentes regiones. En el caso de electricidad se cuenta con la generación para el Perú, como mencionado previamente. En otros casos, no se cuenta con la información del Perú pero se cuenta con modelos para países específicos, para Europa o para el resto del mundo. Por ejemplo, para la producción de concreto premezclado se utiliza la información que corresponde a la producción en el resto de mundo. Dependiendo el caso se utiliza el inventario que resulte más conveniente.

Una vez que se comprende la utilización de la base de datos se procede al montaje del ciclo de vida. A continuación se hace una descripción acerca de la creación del ciclo de vida en el software SimaPro 8.0.5.13.

d) Creación de los procesos:

Primero, se crean los procesos unitarios utilizando la información de los medrados y la base de datos EcoInvent. Luego, se agregan todos los ingresos para la creación de un proceso unitario de manera que se cuenta con la información completa. Con el uso de la información de la base de datos se modela el proceso unitario y se genera un árbol de procesos. A continuación en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se presenta el modo en que se ingresa la información para un proceso determinado y cómo se obtiene el árbol de procesos.

SimaPro permite la elección de un indicador ambiental, en el caso de las figuras presentadas el elegido es TRACI 2.1, y dependiendo del indicador se muestra la caracterización de los impactos.

En la figura 3.3 se aprecian los procesos inventariados de acuerdo a las bases de datos utilizadas en el software SimaPro. Los procesos se dividen en categorías principales como materiales, energía, transporte, procesamiento, uso, escenarios de disposición de desechos y tratamiento de desechos. Además, cada categoría

cuenta con sus propias subcategorías y cada proceso es presentado de acuerdo a la base de datos a la cual pertenece, la unidad funcional, entre otra información pertinente.

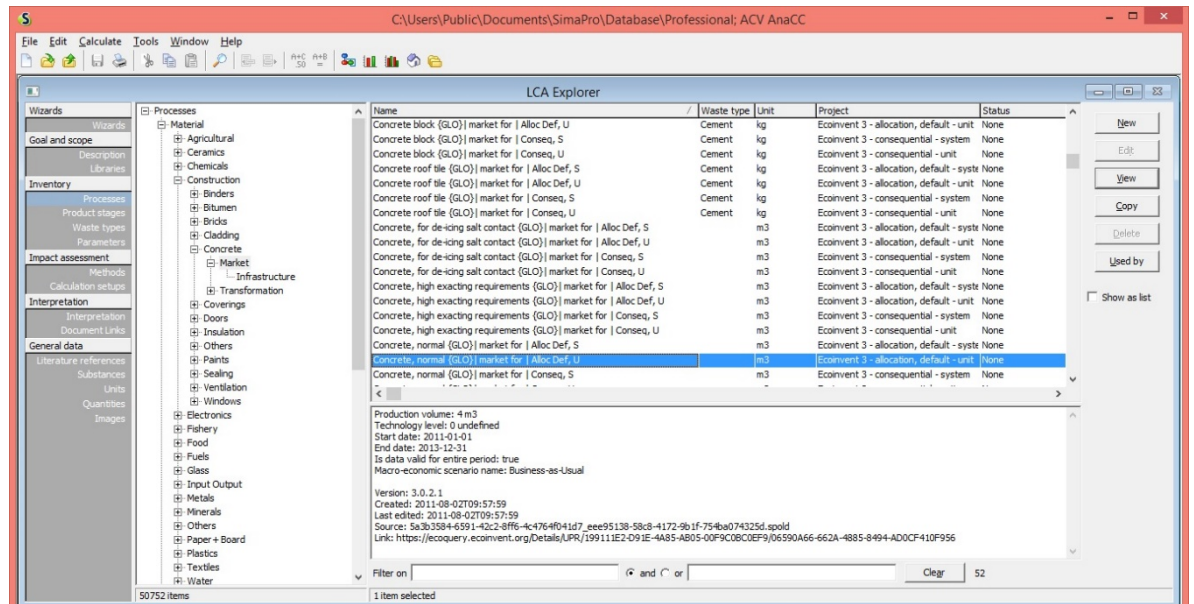


Figura 3.3 Utilización de la base de datos
Fuente: Uso del software SimaPro 8

Los procesos unitarios son creados con la interfaz que se observa en la figura 3.4. Primero, se coloca una descripción del proceso a ser creado. La descripción puede incluir el nombre del proceso, el tipo de proceso, el año, la tecnología empleada, la ubicación geográfica entre otros.

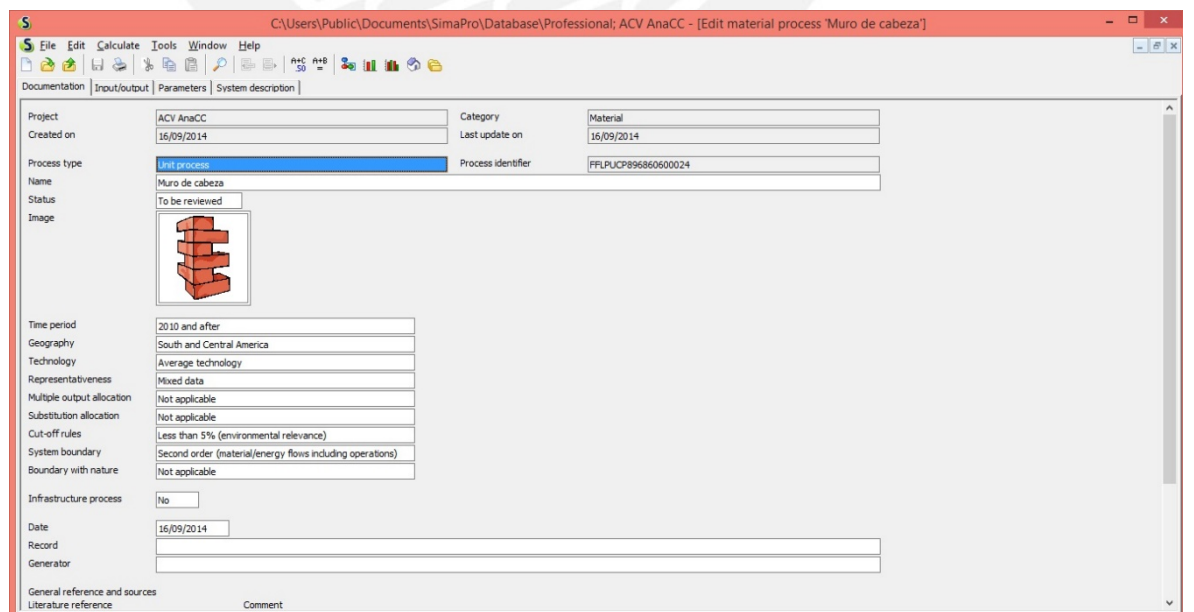


Figura 3.4 Creación del proceso unitario 1
Fuente: Uso del software SimaPro 8

A continuación, se procede a la creación del proceso in situ. Esta incluye la unidad de análisis del mismo. En el caso de la figura 3.5, la unidad de análisis para el muro de cabeza de ladrillos de arcilla es el metro cuadrado. Las entradas para el proceso observado son el ladrillo de arcilla y el mortero.

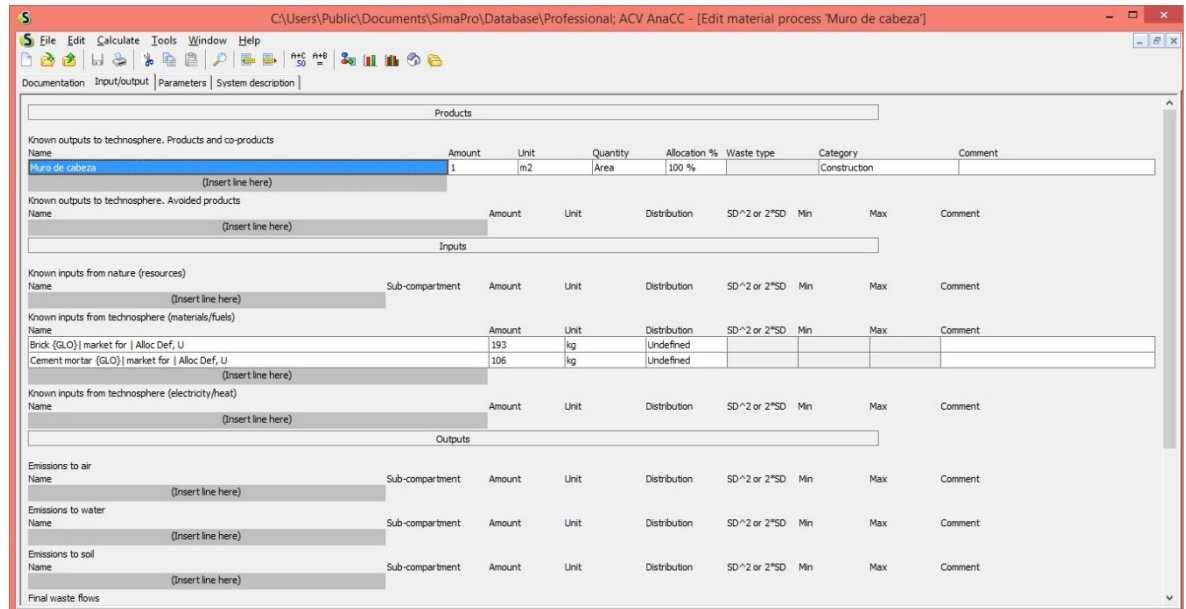


Figura 3.5 Creación del proceso unitario 2
Fuente: Uso del software SimaPro 8

Finalmente, se puede apreciar en la figura 3.6 el resultado del análisis del proceso unitario creado. Se elige la metodología de impacto deseada y se procede a analizar el proceso en la magnitud que se desee, en este caso 1 m² de muro de cabeza. En la figura mencionada se puede observar, como ejemplo, que para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global, la mayor carga de dióxido de carbono equivalente proviene del ladrillo. Siguiendo estos pasos se logran armar todos los procesos unitarios necesarios en el ciclo de vida de las edificaciones estudiadas. De la misma manera, se pueden analizar las diferentes categorías de impacto para cada proceso y para el ciclo de vida completo de las edificaciones.

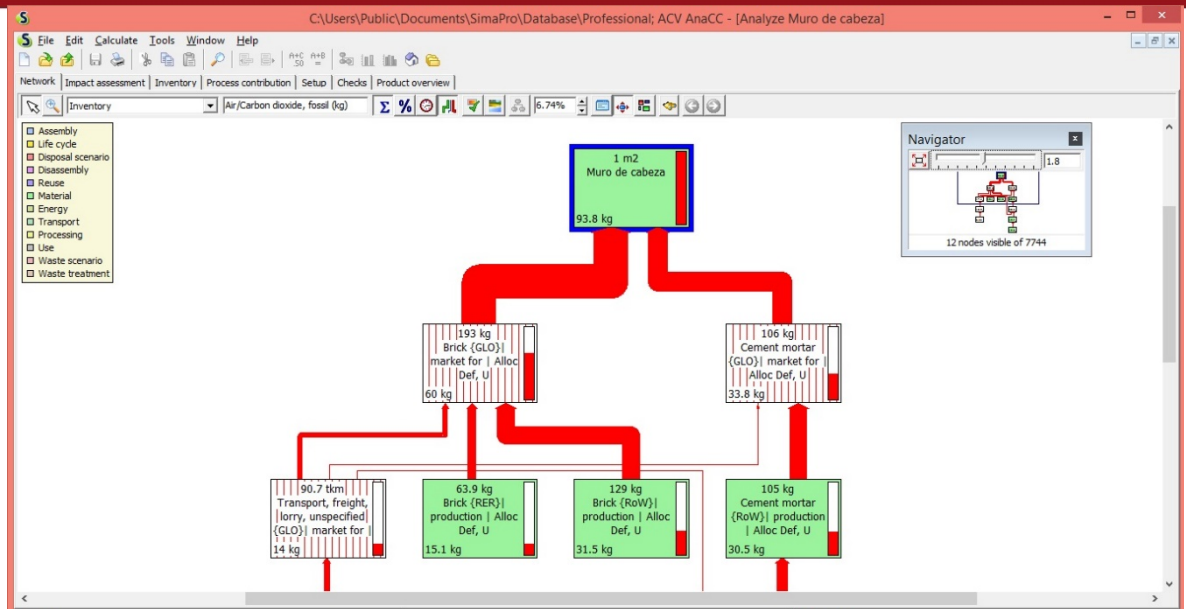


Figura 3.6 Árbol de procesos para 1 m² de muro de cabeza
Fuente: Elaboración propia de proceso unitario en software SimaPro 8

e) Montaje del ciclo de vida:

Con los procesos unitarios creados se procede al montaje del ciclo de vida. El montaje del ciclo de vida consiste en modelar las etapas del producto. Para ello se utiliza la opción “product stages” donde se crean los montajes. Con los montajes creados se puede proceder a la finalización del modelado del ciclo de vida. El ciclo de vida contempla las tres etapas mencionadas previamente: pre-uso, uso y fin de vida.

Para ambos modelos a desarrollar se utilizará el mismo procedimiento en el software SimaPro 8. Se obtendrán dos ciclos de vida independientes lo que serán comparados a través de la utilización de la unidad funcional que se define en el siguiente capítulo.

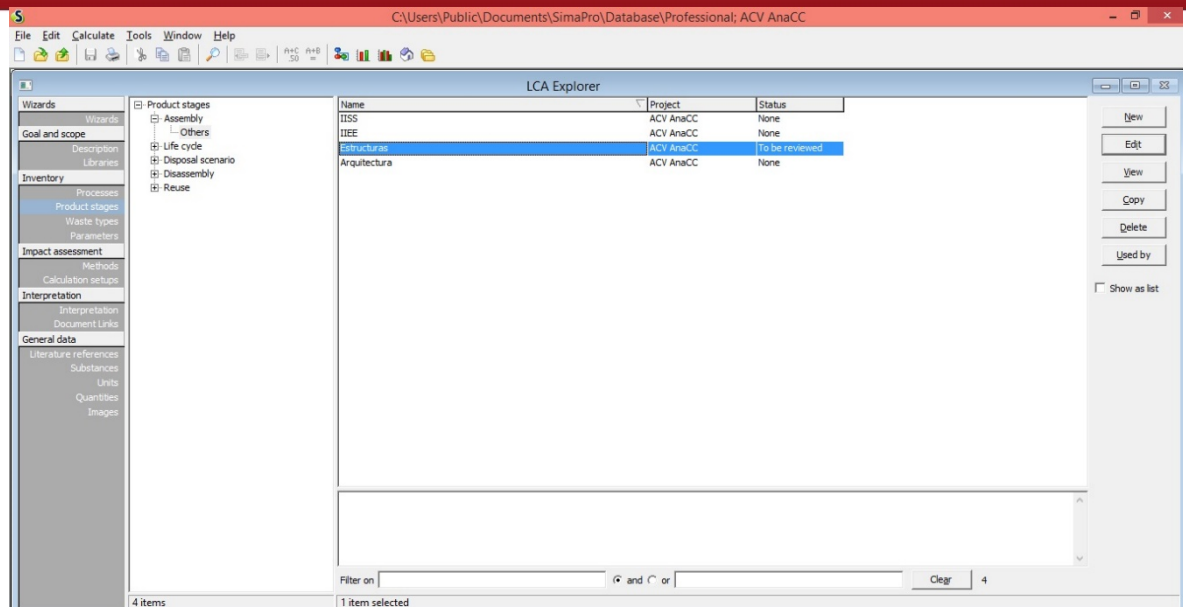


Figura 3.7 Montaje del ciclo de vida

Fuente: Uso del software SimaPro 8

Con el montaje terminado, como se aprecia en la figura 3.7, ya se cuenta con la información completa del ciclo de vida y su **inventario** completo.

f) Caracterización

El software a través del uso de los indicadores permite la caracterización de los impactos como se pudo observar en los resultados del árbol de procesos. Se utilizan las metodologías de impacto TRACI 2.1 (EPA 2012) y CED (PréConsultants 2015b) las cuales serán explicadas en las siguientes secciones del capítulo. Los cálculos son realizados por el software SimaPro 8.0.5.13, el cual tiene integrado en su sistema las metodologías mencionadas.

g) Obtención de los resultados

Con los valores finalmente, se obtienen los resultados que pueden ser exportados desde el programa. Se cuenta con el inventario completo, los resultados de las categorías de impacto dependiendo la metodología elegida y el árbol de procesos para el ciclo de vida completo de la edificación. Este procedimiento es replicado para los dos modelos definidos.

h) Presentación de los resultados

Como mencionado previamente, en la etapa final de la utilización del software se obtiene la información completa para desarrollar el análisis completo. La

información se exporta a través de tablas y cuadros para la realización del análisis comparativo.

i) Análisis comparativo de los resultados

Finalmente, se desarrolla un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los dos modelos mencionados. La unidad que será utilizada para las comparaciones a realizarse, es el metro cuadrado de vivienda construida. Además, se hará una comparación para valores típicos obtenidos en Estados Unidos, de manera que se tiene un contraste entre los resultados adaptados a la realidad peruana y éstos. Adicionalmente, se compararán con los resultados obtenidos en el estudio de García Torres (2014). Esta comparación será referencial debido a que el trabajo de García se centró en una vivienda unifamiliar, y los impactos son diferentes en magnitud. El objetivo de la comparación es analizar la relevancia de las etapas de ciclo de vida de edificaciones de vivienda multifamiliares en el Perú.

3.4 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS A SER ESTUDIADOS

Los ACV que se llevan a cabo en la presente investigación se enfocan en el uso de edificaciones para vivienda. Las dos edificaciones, mencionadas previamente, que se van a modelar tienen como fin albergar a personas con el propósito de vivienda. Uno de los modelos pertenece a un sector socioeconómico C y el segundo modelo a un sector A. El modelo perteneciente al sector A tendrá mayor área en las unidades de vivienda debido al mayor poder adquisitivo. Para poder comparar los resultados, se ha decidido que la unidad funcional contemple la proporción de metros de vivienda de manera que se normalicen los resultados. Por ello, la **unidad funcional será el metro cuadrado (1 m²) de vivienda en la edificación.**

Además, es importante definir los sistemas que se van a estudiar y los límites generales de los mismos (más adelante en la metodología se presentarán las limitaciones presentadas a la hora del desarrollo de los modelos). A continuación se presentan los modelos de los sistemas a ser analizados.

En la figura 3.8, se presentan las 3 etapas principales del ciclo de vida de las edificaciones.



Figura 3.8 Etapas del ciclo de vida de las edificaciones en los modelos del ACV

Como se puede apreciar las tres etapas mencionadas engloban todo el ciclo de vida de la edificación. En la etapa de pre-uso se contemplan la extracción de las materias primas, la producción de los materiales de construcción, el transporte, todas las variables hasta la venta del producto y la colocación en la obra, y la construcción in situ.

Además, se quiere determinar a través de este estudio las magnitudes que tienen estas tres etapas y su importancia dentro del ciclo de vida completo en comparación de los dos modelos que serán definidos más adelante. Para esto, se define que la vida útil de la vivienda, y por ende el edificio de viviendas, es de 50 años. Este valor se toma como estándar de los proyectos de ACV desarrollados en el rubro de edificaciones mencionados previamente.

La etapa de uso incluye los consumos de electricidad y agua durante los años de vida útil de la edificación. Además, se contempla el mantenimiento de la edificación en el que se considera que las edificaciones serán pintadas cada dos años.

Finalmente, la etapa de fin de vida contempla el transporte de los residuos sólidos para disposición final. Se ha incluido sólo esta característica debido a que resulta complejo modelar los gastos energéticos involucrados en la demolición de las edificaciones. Tampoco se contempla el tratamiento en sí de los residuos en el relleno sanitario.

Según valores comunes de estudios realizados en edificaciones la importancia de la fase de uso se encuentra alrededor del 90% del ciclo de vida total en consumo energético. Este alto valor se atribuye a la utilización de calefacción y aire

acondicionado en los Estados Unidos como mencionado previamente. Para el caso del Perú, como no se cuenta con muchos estudios salvo el estudio de García Torres (2014) para una vivienda unifamiliar, se desea encontrar información acerca de la relevancia de las etapas dentro del ciclo de vida completo.

A continuación, se presentan los modelos seleccionados para el estudio.

3.4.1 MODELO 1

El primer modelo es un edificio de vivienda multifamiliar de 8 pisos ubicado en el distrito de Santiago de Surco, en la ciudad de Lima. Cuenta con un total de 108 departamentos y un total del lote de 3,562 m². La duración de la obra fue de 10 meses. El área de vivienda asciende a 9409 m². El consumo eléctrico considerado para las viviendas del tipo C fue de 278 KWh al mes basado en estimaciones de Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN 2016).

La característica principal del edificio es el sistema estructural. Éste es un edificio de ductilidad limitada. Esto significa que se encuentra conformado por muros y losas de concreto armado de un espesor entre 10 y 15 centímetros para muros y 10 a 17 centímetros para losas. Los estacionamientos se encuentran en una losa de espesor 20 centímetros, incluida como parte del modelo. No cuenta con sótanos. A continuación en la siguiente figura se presentan los límites del sistema del edificio de ductilidad limitada.

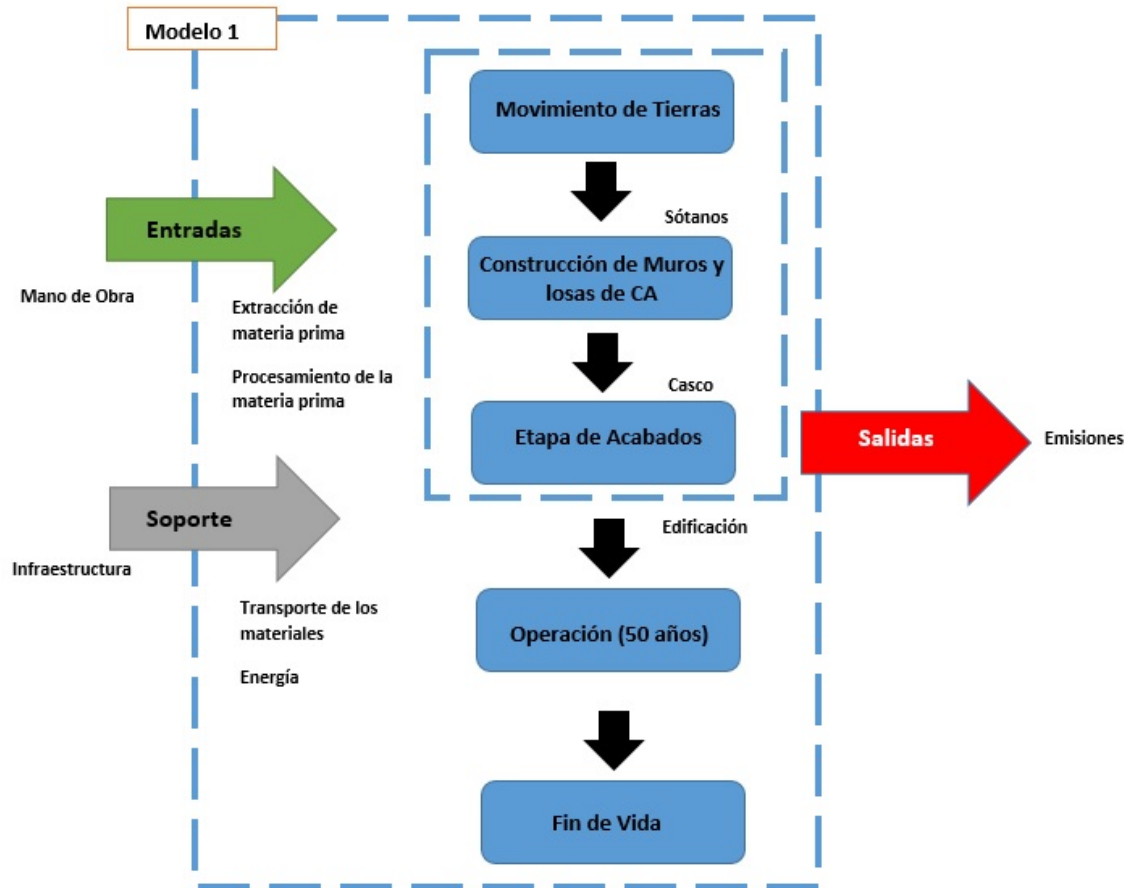


Figura 3.9 Límites del sistema del Modelo 1

3.4.2 MODELO 2

El segundo modelo es un edificio de vivienda multifamiliar de 4 pisos más azotea ubicado en el distrito San Isidro, en la ciudad de Lima. El edificio tiene un área destinada a vivienda de 1779 m² y la duración de la obra se estima en 10 meses. El edificio cuenta con un semisótano por el que se hicieron excavaciones. Este edificio multifamiliar cuenta además con 4 unidades de vivienda. Se analizará el metro cuadrado de construcción de la edificación con el fin de comparar los dos modelos. El consumo eléctrico considerado para las viviendas del tipo A fue de 1050 kWh al mes (OSINERGMIN 2016).

La característica principal del edificio, en contraste con el primer modelo, es que ha sido construido con un sistema estructural dual de pórticos y placas, con tabiquería de ladrillo de arcilla en su mayoría. En la siguiente figura se presentan los límites del sistema para el edificio dual.

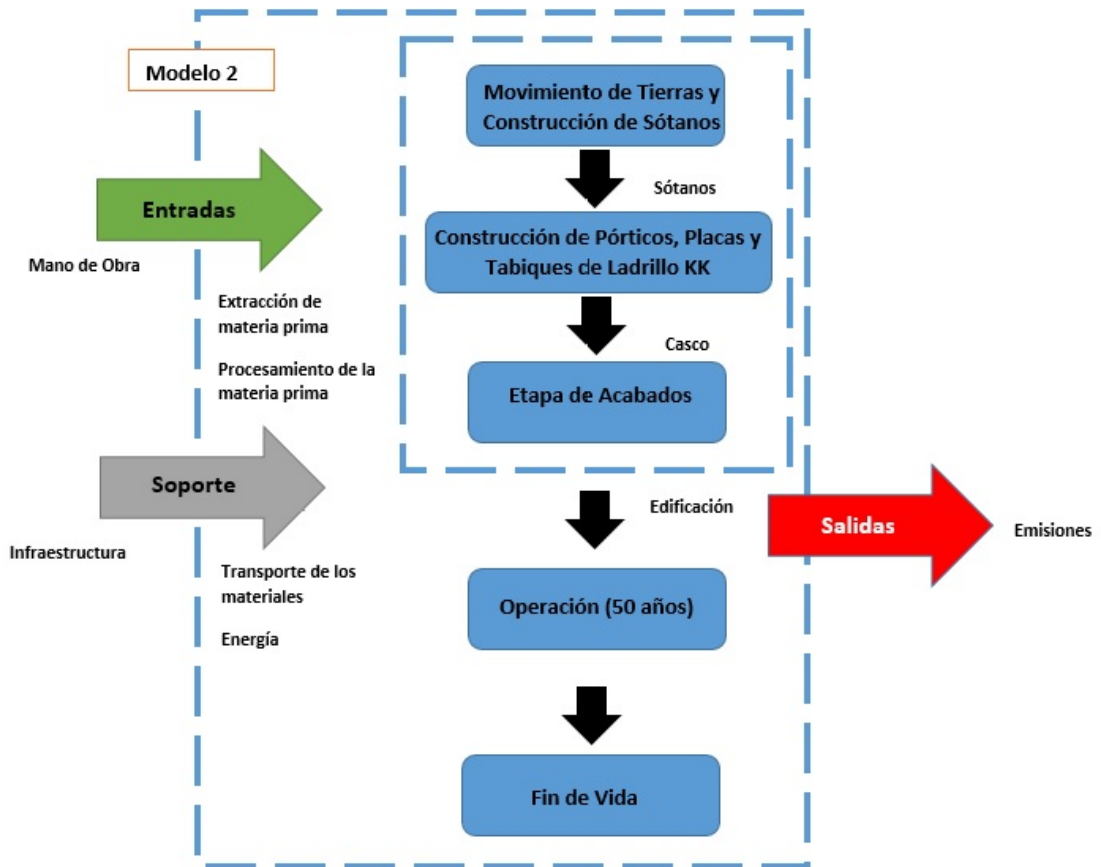


Figura 3.10 Límites del sistema del Modelo 2

3.4.3 LÍMITES GEOGRÁFICOS Y TEMPORALES DEL SISTEMA

Los límites geográficos y temporales para los sistemas mencionados analizados a través de la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida, comprenden los edificios multifamiliares escogidos que han sido desarrollados en la ciudad de Lima en la primera década del siglo XXI. El tipo de suelo es el mismo: grava limeña, por lo que no se tuvo que hacer ningún tipo de mejoramiento de suelo.

Se consideró que la tecnología para el desarrollo de la construcción es la misma para ambos casos, al igual que los estándares de seguridad, debido a que han sido desarrollados por constructoras formales importantes.

No se consideraron los ascensores para los edificios de ninguno de los modelos analizados debido a que se consideran como un sistema de análisis independiente al edificio. Los ascensores son en sí un proyecto de ACV diferente. Para los acabados de las paredes, se consideró el tarrajeo en primera capa.

Por otro lado, el tema de la mano de obra queda excluido del estudio por su complejidad de análisis. La mano de obra es de vital importancia dado que sin ella ningún producto podría efectuarse pero debido a la complejidad del cálculo se excluye. La investigación publicada en el 2012 por Rugani, realiza a través de un ACV híbrido un marco para la cuantificación de los impactos en el ciclo de vida de la mano de obra para distintos rubros de la economía (Rugani, Panasiuk y Benetto 2012). Este proceso resulta sumamente complejo para poder desarrollarlo en el presente estudio por lo que no será considerada para ninguno de los modelos a tratarse.

Se utilizó la información recogida de consumos de electricidad y agua de Luz del Sur, OSINERGMIN y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). No se consideró el uso de gas natural como fuente de energía de las edificaciones debido a que los proyectos no cuentan con las instalaciones necesarias para este tipo de combustible. Por ello, en el cálculo eléctrico se considera la utilización de cocinas eléctricas.

La información utilizada para los procesos unitarios para ambos sistemas pertenece a la base de datos EcoInvent 3.01. Los procesos obtenidos de esta base de datos son modelados utilizando el software SimaPro 8.0.5.13 (PréConsultants 2015a). La electricidad para el Perú se basó en la versión de EcoInvent 3.01 (Weidema et ál. 2013) y corresponde a la producción de electricidad del año 2008. La elección de este proceso será explicada en la siguiente sección.

Se consideró el ciclo de vida incluyendo etapa de pre-uso, la etapa de operación y mantenimiento, y el fin de vida el cual contempla, como previamente mencionado, el transporte de los residuos de demolición. La ciudad de Lima cuenta con 4 rellenos sanitarios: Huaycoloro, Modelo Callao, Portillo Grande y Zapallal (OEFA 2014). Los residuos de Lima Centro, a la cual pertenecen el distrito de Santiago de Surco y el distrito de San Isidro en los que se encuentran las edificaciones en análisis, son llevados a los cuatro rellenos promediando una distancia de 30 kilómetros para el desecho de los escombros de demolición y otros (OEFA 2014). Esta es la distancia tomada para el modelo del transporte de residuos de demolición del fin de vida.

3.5 MATRIZ ENERGÉTICA PERUANA

La matriz energética de un país es muy importante para la determinación de los impactos ambientales producidos a causa del uso energético. Si un país tiene una base en energía hidroeléctrica renovable de bajo impacto ambiental, el uso de la electricidad derivada de ésta tendría menos impactos ambientales que la electricidad derivada de una planta térmica de carbón. Los datos obtenidos para la matriz peruana son los presentados por el Ministerio de Energía y Minas (2014) y la data estadística presentada es el 2012.

La matriz energética del Perú al año 2012 se presenta en la figura a continuación. Es importante analizar la matriz energética del Perú, debido a que la fase de uso de la edificación tiende a tener gran importancia en su ciclo de vida. Además, se analizará la generación eléctrica por fuentes.

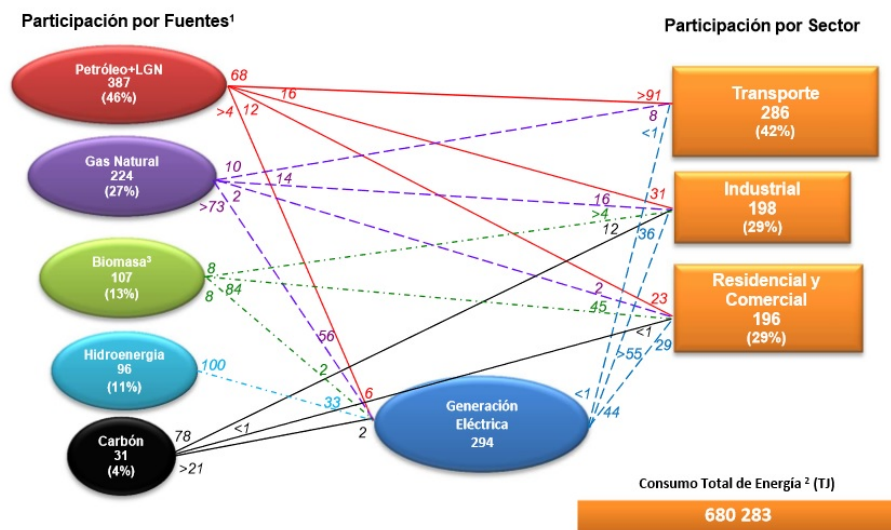


Figura 3.11 Matriz Energética del Perú 2012 – PJ
Fuente: Ministerio de Energía y Minas 2014

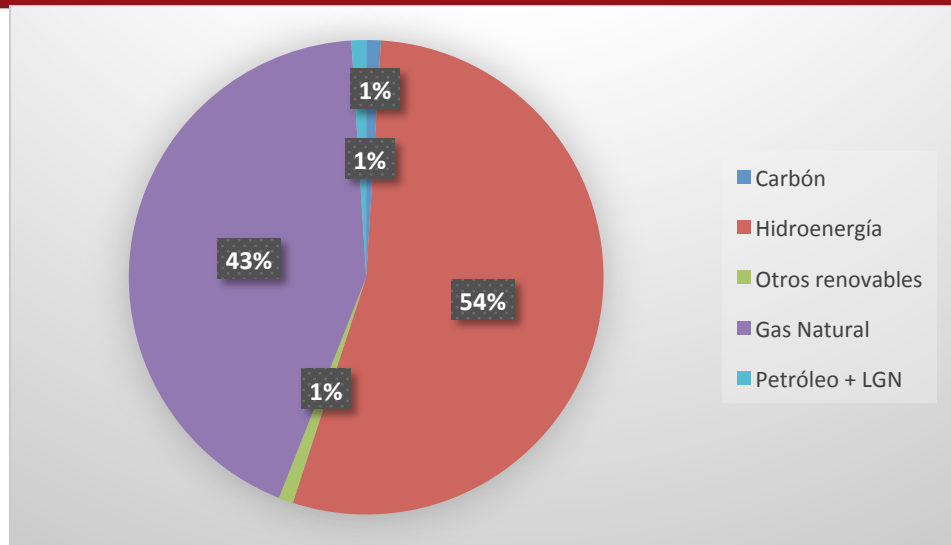


Figura 3.12 Generación de electricidad por fuente 2012
Fuente: Adaptado del Ministerio de Energía y Minas 2014

De acuerdo a la base de datos de Ecolnvent, la cual se basa en la matriz energética del Perú al año 2008, se tiene la siguiente distribución para la generación de electricidad.

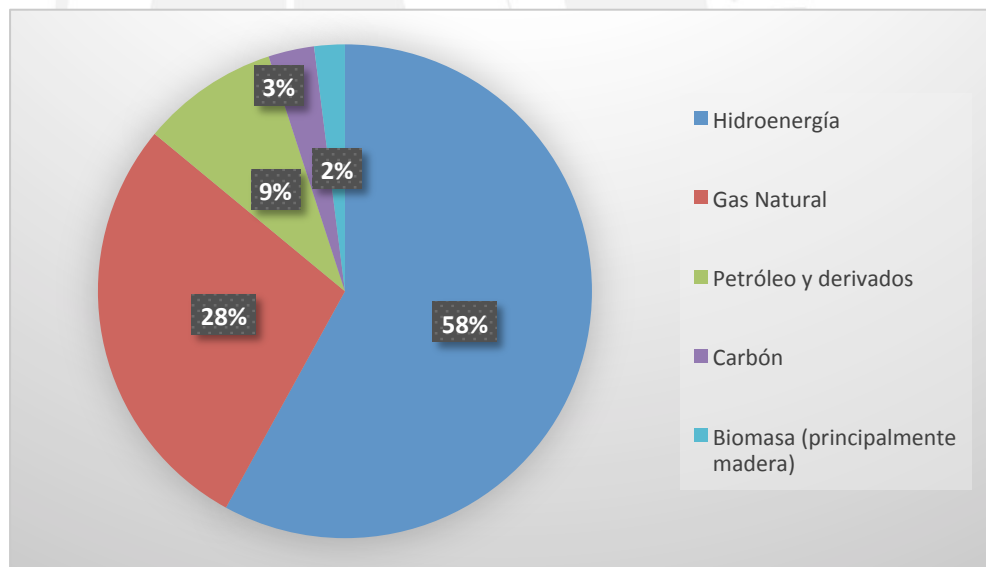


Figura 3.13 Generación de electricidad por fuente Perú 2008
Fuente: Adaptado de Itten, Frischknecht & Stucki 2014

En el momento del desarrollo de la investigación no se contaba con la matriz eléctrica actualizada por lo que se trabajó con los datos pertenecientes al año 2008. La variación en la generación eléctrica por combustibles fósiles entre el 2008 y el 2012 es del 5% por lo que no se considera significativa y por ello no se actualizaron los datos (MINEM 2014 & Itten, Frischknecht y Stucki 2014). El rubro de

hidroeléctricas sigue representando más del 50% de la matriz mencionada por lo que se podría decir que la electricidad peruana es bastante limpia.

3.6 INDICADOR DE ENERGÍA PRIMARIA CONSUMIDA – “CUMULATIVE ENERGY DEMAND”

El indicador de consumo de energía primaria CED (Cumulative Energy Demand) desarrollado en un primer momento por EcolInvent y expandido por Pré Consultants (PréConsultants 2015b), resulta muy útil para comparar la energía primaria en distintos ACV. Esta metodología para calcular las categorías de impacto se eligió para el estudio dado que mide directamente la energía consumida en Mega Julios. Además, se puede utilizar la metodología para analizar el uso de diferentes tipos de combustibles y fuentes de energía durante el ciclo de vida. Para el presente trabajo se utiliza como indicador la energía primaria consumida. Por otro lado, es importante complementar los resultados con otra metodología que incluye más categorías de impacto. En el presente trabajo se complementó la energía primaria consumida con la metodología TRACI 2.1 (EPA 2012).

3.7 METODOLOGÍA TRACI 2.1

El Inventario, como su nombre lo dice, es una lista de emisiones y gastos cuya interpretación resulta sumamente compleja. Por ejemplo, es difícil determinar, en un primer momento, que sustancias contribuyen al calentamiento global. Por ello, se utilizan metodologías de cálculo de impactos ambientales que ayudan a traducir los inventarios en categorías menos complejas. Para la presente investigación, se eligió la metodología TRACI 2.1. Esta elección se debió a que este método fue desarrollado en E.E.U.U. acercándose más a la realidad americana que los métodos europeos.

La metodología TRACI 2.1, cuyas siglas en inglés se traducen a “Herramienta para la Reducción y Análisis de los Impactos Químicos y Ambientales” (EPA 2012), se desarrolló como herramienta de medición de sostenibilidad, análisis de impacto de ciclo de vida, ecología industrial y procesos de diseño de impacto para el desarrollo de productos, procesos, compañías y comunidades sostenibles (EPA 2012). La primera versión de TRACI fue publicada en el año 2002 y actualmente se trabajará con la versión 2.1.

TRACI 2.1 es una metodología de indicadores intermedios con un total de 7 indicadores intermedios que se traducen en 10 categorías de impacto analizadas en este estudio. Los indicadores son los siguientes: agotamiento del ozono estratosférico, potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, formación de smog, criterio de salud humana, y el agotamiento de los recursos. El indicador de salud humana se divide en cuatro categorías que serán analizadas por separado. Además, el indicador del agotamiento de recursos se divide en tres categorías, de las cuales solo la primera será abordada en los resultados. Estas categorías fueron elegidas consistentemente con la información, las políticas y regulaciones existentes en E.E.U.U. y Canadá, la importancia que poseen y la facilidad de su modelamiento. A continuación, se presenta una breve descripción de los indicadores mencionados.

1. Agotamiento del Ozono Estratosférico

El ozono estratosférico protege a la tierra de la radiación UV del sol. Si se disminuye la concentración de ozono en la estratósfera esta protección también disminuye y aumenta el riesgo del cáncer de piel y cataratas en la población mundial. Las sustancias que se relacionan normalmente al agotamiento del ozono son los clorofluorocarbonos (CFCs) utilizados como refrigerantes, solventes, alones para extintores de fuego, etc. Hace 20 años se firmó el Protocolo de Montreal en que se comprometieron varias naciones a reducir la producción de CFCs. Se espera la recuperación de la capa de ozono en alrededor de 50 años (EPA 2008), por lo que resulta importante esta categoría de impacto. Se cuantifica con la masa equivalente de CFC-11 emitida.

2. Potencial de Calentamiento Global

El calentamiento global es el aumento en promedio de la temperatura de la atmosfera de la tierra, específicamente en la tropósfera. Este aumento en la temperatura es la principal cause del cambio climático. Normalmente se relaciona al calentamiento global como el resultado del aumento de las emisiones de gases invernaderos.

La metodología TRACI utiliza el potencial de calentamiento global para calcular la potencia de los gases invernaderos relativos a las emisiones de dióxido de carbono equivalentes (kg. de CO₂ equivalentes) dentro de un horizonte de tiempo de 100 años que concuerda con los lineamientos de la EPA (EPA 2012) y con los lineamientos de la metodología del IPCC (IPCC 2007). El valor del horizonte de tiempo de 100 años equivale a la energía absorbida por el gas en el periodo de tiempo mencionado. Se pueden utilizar otros horizontes de tiempo, como lo son 20 años o 500 años, pero el estándar de la EPA es usar el horizonte de 100 años. Los factores de caracterización variarán dependiendo de la duración de la influencia de los gases en la atmósfera. Los gases de menor duración en la atmósfera tendrán una menor caracterización en el horizonte de 100 años que en el de 20 años y viceversa (EPA 2016).

3. Acidificación

La acidificación es el incremento en la concentración del ion de Hidrógeno en un ambiente local. Usualmente las sustancias ácidas son emitidas al aire y pueden viajar cientos de kilómetros antes de ser depositadas como lluvia ácida, niebla o deposición seca en forma de polvo. Los óxidos nitrosos y el dióxido de azufre son los mayores contribuyentes a la lluvia ácida (EPA 2012).

Estas sustancias pueden causar daños a los materiales de construcción, a las pinturas, y demás estructuras construidas por el hombre, además de tener impactos negativos sustanciales en los ecosistemas vivos incluyendo ríos y océanos (EPA 2012). En la metodología se utiliza este potencial de aumento en la concentración de hidrógeno sin incorporar características que protejan a los ambientes. La acidificación se cuantifica con la masa equivalente de dióxido de azufre (kg de SO₂ equivalentes) emitida.

4. Eutrofización

La eutrofización es el enriquecimiento del ecosistema acuático con nutrientes que aceleran la productividad biológica y por consecuencia una acumulación no deseada de la biomasa en forma de algas. Las altas

concentraciones de fósforo y nitrógeno genera el crecimiento indiscriminado de algas que consumen el oxígeno disponible en el medio. La eutrofización se mide en masa equivalente de nitrógeno emitido a la atmósfera (kg de N equivalentes).

5. Formación de Smog

La concentración de ozono a nivel troposférico es sumamente dañina para la salud humana. La reacción entre los compuestos de óxidos nitrosos y compuestos orgánicos volátiles generan el ozono troposférico y pueden ser perjudiciales a la salud con efectos como bronquitis, asma, y enfisema. La exposición continua al ozono puede significar daño pulmonar permanente (EPA 2012). La metodología TRACI cuenta con más de 1200 sustancias en análisis para la formación de ozono. La formación de smog se mide con la masa equivalente emitida de ozono (O_3) al ambiente.

6. Criterio de Salud Humana:

El indicador de criterio de salud humana divide los impactos en cuatro categorías para poder ser más específico acerca de las causas de los mismos. A continuación, se presenta una breve explicación de cada categoría.

a. Partículas Volátiles

Las partículas de materia son la recolección de pequeñas partículas en el ambiente del aire que tienen la capacidad de causar daño a la salud humana en forma de enfermedades respiratorias y hasta la muerte. El modelo para el cálculo de los impactos en la salud humana de las partículas incluye el nivel de exposición a las partículas. Los precursores más comunes son el dióxido de azufre y los óxidos nitrosos. La sustancia de referencia son las partículas $PM_{2.5}$ las cuales son menores a 2.5 micrómetros en diámetro.

Las siguientes categorías se calculan en la metodología TRACI 2.1 utilizando el modelo "USEtox" que incluye más de 3000 sustancias orgánicas e inorgánicas con potenciales efectos cancerígenos, tóxicos no

cancerígenos y en la eco-toxicidad del agua potable. Además, “USEtox” incluye dos escalas espaciales: continental y global (EPA 2012).

b. Sustancias Cancerígenas, No Cancerígenas y Eco-toxicidad

Estas categorías son analizadas con la unidad comparativa de toxicidad (CTU) por kilogramo de sustancia emitida. Para las dos primeras categorías las unidades de CTU corresponden al daño al ser humano CTUh, siendo la relativa a la toxicidad cancerígena, y a la toxicidad no cancerígena. Por otro lado, la eco-toxicidad es relativa a las especies afectadas en un ecosistema y se representa por CTUe.

$$1 \text{ CTUh por kg. emitido} = \text{Casos de Enfermedad por kg. emitido}$$

$$1 \text{ CTUe por kg. emitido} = \text{PAF} \times m^3 \times \text{día por kg. emitido} \text{ (PAF es el potencial de la fracción de especies afectadas)}$$

7. Agotamiento de los recursos

El agotamiento de los recursos es una de las categorías más difíciles de cuantificar. Todas las categorías mencionadas cuentan con legislación y/o tratados internacionales relacionadas con su control, pero esta categoría no, lo que la hace más difícil de analizar. Se decidió que las categorías de análisis serían las siguientes:

- a. Combustibles Fósiles
- b. Uso de la Tierra
- c. Uso del Agua

Sin embargo, las dos últimas categorías todavía se encuentran en desarrollo y serán específicas para ubicación, meteorología y ecosistemas existentes; por lo que en la presente investigación solo se presenta el agotamiento de los combustibles fósiles. La unidad de análisis de combustibles fósiles es el excedente de Mega Julios (EPA 2012).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1 ENERGÍA PRIMARIA CONSUMIDA

Los resultados obtenidos para los dos modelos realizados, se presentan a continuación. Como mencionado previamente, se ha utilizado el indicador de energía primaria consumida CED. El indicador de consumo de combustibles fósiles como indicador de consumo energético durante el ciclo de vida de los modelos realizados se encuentra incluido en la metodología TRACI 2.1, por lo que no se considera en esta sección.

4.1.1 CICLO DE VIDA MODELO 1

El primer modelo, es el modelo de ductilidad limitada, edificio de 8 pisos, 108 unidades de vivienda y 9409 m². El consumo total del ciclo de vida la edificación de viviendas fue de 2.38×10^8 MJ. En la siguiente tabla se presentan los valores hallados para las diferentes etapas del ciclo de vida del modelo 1.

Tabla 4.1 Energía primaria consumida modelo 1

Edificio	Energía Primaria Fase Pre-Uso (MJ)	Energía Primaria Fase Uso (MJ)	Energía Primaria Fase Fin de Vida (MJ)	Energía Primaria Total (MJ)
Modelo 1	1.15×10^8	1.22×10^8	9.20×10^5	2.38×10^8

Además, en la figura 4.1 se observa la relevancia de las distintas fases del ciclo de vida del edificio de ductilidad limitada.

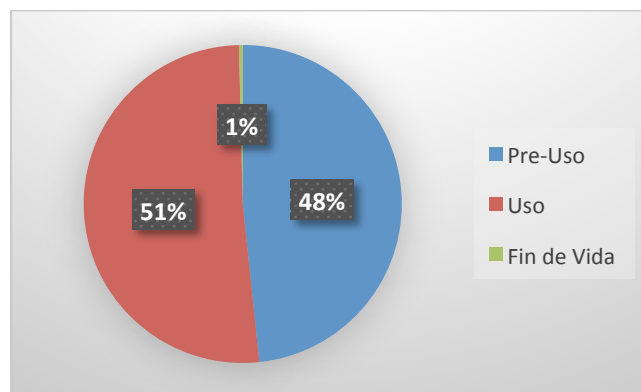


Figura 4.1 Importancia de las etapas del ciclo de vida del Modelo 1

Se puede atribuir la importancia de la fase de pre-uso al consumo intensivo de concreto y acero de refuerzo. Este tipo de edificaciones, son construidas básicamente de concreto armado. La fabricación del cemento es uno de los procesos industriales más intensivos en consumo energético, al igual que la fabricación del acero de refuerzo. La fase de pre-uso de la edificación consume 1.15×10^8 MJ, representando el 48% de todo el ciclo de vida.

La fase de uso es la de mayor importancia con un total de 1.22×10^8 MJ consumidos, representando el 51% de la energía primaria consumida en el ciclo de vida de la edificación. Para la fase de uso se consideró el consumo de agua en las viviendas del edificio, el consumo eléctrico y un mantenimiento cada dos años que correspondía al resane de las paredes de la edificación.

Finalmente, la fase de fin de vida contempla el transporte de los desechos a un relleno sanitario. Debido al gran tamaño de la edificación el transporte de materiales sería intensivo en la quema de combustibles fósiles, en la forma de gasolina o diésel, para la operación de los volquetes. En esta fase hubo un consumo de 9.20×10^5 MJ de energía primaria.

4.1.2 CICLO DE VIDA MODELO 2

Al igual que para el primer modelo presentado se halló el total de energía primaria consumida en el ciclo de vida de la edificación. Este segundo modelo, consta de un edificio de 4 pisos más azotea, 4 unidades de vivienda, y 1779 m^2 de vivienda construidos. El consumo energético total hallado con el indicador CED fue de 4.20×10^7 MJ. Nuevamente, se presenta en la tabla 4.2 los consumos para las diferentes fases del ciclo de vida de la edificación.

Tabla 4.2 Energía primaria consumida modelo 2

Edificio	Energía Primaria Fase Pre-Usa (MJ)	Energía Primaria Fase Uso (MJ)	Energía Primaria Fase Fin de Vida (MJ)	Energía Primaria Total (MJ)
Modelo 2	2.51×10^7	1.67×10^7	1.66×10^5	4.20×10^7

A continuación, se presenta la relevancia de las fases del ciclo de vida a través del siguiente gráfico.

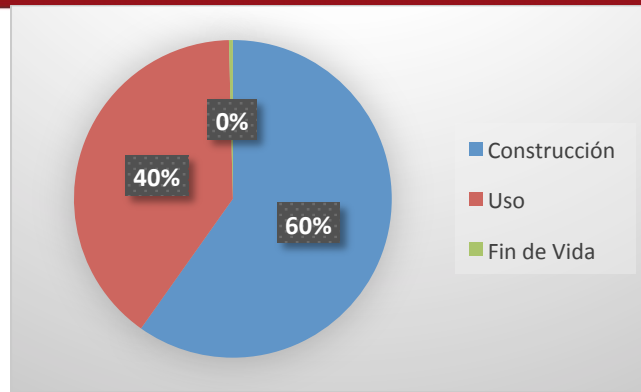


Figura 4.2 Importancia de las etapas del ciclo de vida del Modelo 2

En este modelo, la fase de pre-uso tiene una mayor importancia con respecto al modelo 1. La fase de construcción con un consumo de energía primaria de 2.51×10^7 MJ representa el 60% del ciclo de vida de toda la edificación. Esto se debe probablemente a la cantidad de concreto utilizada versus la poca densidad de viviendas en la edificación. Se debe resaltar que son 4 viviendas de más de 350 m^2 en este modelo, mientras que en el modelo 1 se construyen 108 viviendas de aproximadamente 89 m^2 cada una.

Por otro lado, la fase de uso consume 1.67×10^7 MJ, representando un 40% del ciclo de vida de la edificación. Este consumo sigue siendo representativo en el ciclo de vida de las edificaciones.

Finalmente, el fin de vida, el cual involucra el transporte del desmonte de construcción al relleno sanitario consume un total de 1.66×10^5 MJ, siendo una etapa no muy significativa que representa el 0.4% de la energía primaria de todo el ciclo de vida de la edificación. Este valor podría ser mayor al considerarse la demolición en sí y el tratamiento en el relleno sanitario. Ambos han quedado fuera del sistema de análisis para los modelos estudiados como mencionado previamente.

4.2 INDICADORES TRACI 2.1

Para la evaluación de los impactos ambientales producto del ciclo de vida de los dos modelos de edificaciones. Se utilizan los indicadores intermedios de la metodología norteamericana TRACI 2.1. Para cada uno de los modelos se expondrán los 10 indicadores intermedios de TRACI 2.1.

4.2.1 INDICADORES TRACI 2.1 MODELO 1

Para el primer modelo estudiado se presentan a continuación los impactos encontrados utilizando la metodología TRACI 2.1. Se puede observar una variación en la importancia de las etapas de ciclo de vida para cada categoría de impacto debido a la distinta naturaleza de las mismas.

Tabla 4.3 Resultados modelo 1 TRACI 2.1

Categoría de impacto	Pre-Uso		Uso		Fin de Vida		Total
Agotamiento de ozono (kg CFC-11 eq.)	0.523	60.2%	0.340	39.1%	0.005	0.6%	0.868
Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ eq.)	1.04 x 10 ⁷	51.2%	9.60 x 10 ⁶	47.3%	5.74 x 10 ⁴	0.3%	2.01 x 10⁷
Formación de smog (kg O ₃ eq.)	7.18 x 10 ⁵	56.4%	5.51 x 10 ⁵	43.3%	4.84 x 10 ³	0.4%	1.27 x 10⁶
Acidificación (kg SO ₂ eq.)	7.79 x 10 ⁴	61.9%	4.77 x 10 ⁴	37.9%	210	0.2%	1.26 x 10⁶
Eutrofización (kg N eq.)	5.86 x 10 ⁴	82.2%	1.26 x 10 ⁴	17.7%	49	0.1%	7.12 x 10⁴
Sustancias cancerígenas (CTUh)	1.48	84.9%	0.257	14.7%	0.002	0.1%	2.000
Sustancias no cancerígenas (CTUh)	11.80	87.3%	1.67	12.4%	0.01	0.1%	13.00
Partículas volátiles (kg PM _{2.5} eq.)	10200	43.8%	13000	55.9%	23	0.1%	23223
Ecotoxicidad (CTUe)	2.57 x 10 ⁸	87.2%	3.70 x 10 ⁷	12.6%	2.81 x 10 ⁵	0.1%	2.94 x 10⁸
Agotamiento de Combustibles fósiles (MJ excedentes)	9.68 x 10 ⁶	41.8%	1.34 x 10 ⁷	57.9%	1.15 x 10 ⁵	0.5%	2.32 x 10⁷

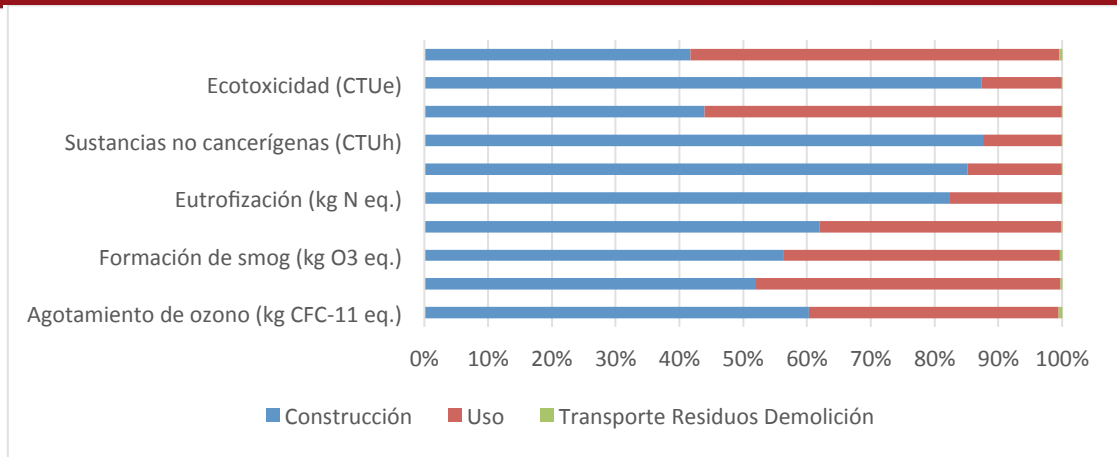


Figura 4.3 Categorías de impacto TRACI 2.1 modelo 1

Como se puede observar en la figura 4.3, el fin de vida es poco significativo en los impactos ambientales del ciclo de vida del primer modelo.

Por otro lado, la fase de pre-uso y la fase de uso varían en su importancia dependiendo la categoría de impacto en mención. La mayor cantidad de categorías muestran que la etapa de pre-uso es la que mayor impacto conlleva (8 de 10 categorías con representación mayor al 50%). Para las categorías de criterio salud humana, partículas volátiles, y agotamiento de combustibles fósiles, la etapa de uso tuvo mayor importancia con 55.9% y 57.9% del impacto respectivamente. Aun así, la fase de pre-uso domina notoriamente sobre el resto de categorías con 87.3% del impacto en criterio salud humana: sustancias no cancerígenas, 87.2% del impacto en ecotoxicidad, 84.9% del impacto en criterio salud humana: sustancias cancerígenas, y 82.2% en eutrofización.

4.2.2 INDICADORES TRACI 2.1 MODELO 2

Para el segundo modelo en estudio se presentan de la misma manera los impactos encontrados con la metodología en mención. Se puede observar para todas las categorías la mayor relevancia en la etapa de pre-uso al igual que para el indicador CED.

Tabla 4.4 Resultados modelo 2 TRACI 2.1

Categoría de impacto	Pre-Usó		Usó		Fin de Vida		Total
Agotamiento de ozono (kg CFC-11 eq.)	0.113	70.5%	0.046	28.9%	0.001	0.6%	0.160
Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ eq.)	2.77 x 10 ⁶	66.9%	1.36 x 10 ⁶	32.8%	1.04 x 10 ⁴	0.3%	4.14 x 10⁶
Formación de smog (kg O ₃ eq.)	2.08 x 10 ⁵	73.2%	7.54 x 10 ⁴	26.5%	872	0.3%	2.84 x 10⁵
Acidificación (kg SO ₂ eq.)	1.56 x 10 ⁴	70.5%	6.48 x 10 ³	29.3%	38	0.2%	2.21 x 10⁴
Eutrofización (kg N eq.)	8.09 x 10 ³	82.7%	1.68 x 10 ³	17.2%	9	0.1%	9.78 x 10³
Sustancias cancerígenas (CTUh)	0.311	90.3%	0.033	9.6%	0.000	0.1%	0.344
Sustancias no cancerígenas (CTUh)	1.350	85.5%	0.226	14.3%	0.002	0.1%	1.578
Partículas volátiles (kg PM _{2.5} eq.)	2.17 x 10 ³	54.8%	1.78 x 10 ³	45.0%	4	0.1%	3.95 x 10⁶
Ecotoxicidad (CTUe)	3.01 x 10 ⁷	86.1%	4.79 x 10 ⁶	13.7%	5.06 x 10 ⁴	0.1%	3.49 x 10⁷
Agotamiento de Combustibles fósiles (MJ excedentes)	2.22 x 10 ⁶	54.3%	1.85 x 10 ⁶	45.2%	2.07 x 10 ⁴	0.5%	4.09 x 10⁶

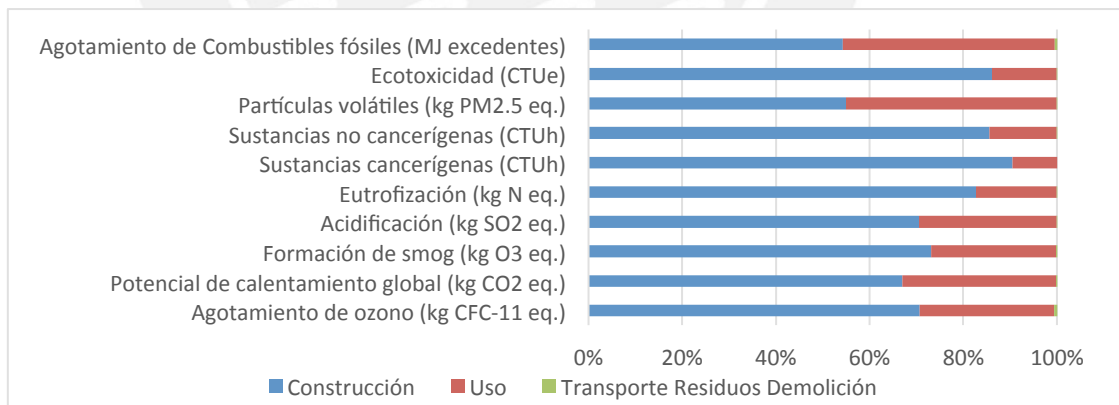


Figura 4.4 Categorías de impacto TRACI 2.1 modelo 2

Nuevamente, como se aprecia en la figura 4.4, el fin de vida es poco representativo de los impactos del ciclo de vida para cualquiera de las categorías. Siendo la categoría de agotamiento de ozono en la cual se tiene el mayor impacto con 0.001 kg de CFC equivalentes que representan el 0.6% del impacto en todo el ciclo de vida de la edificación.

En todas las categorías de impacto a ser analizadas se puede apreciar que la fase de pre-uso es la que mayor importancia tiene. Este resultado es congruente con el consumo primario de energía CED al 60% del ciclo de vida. Para la mayor parte de las categorías la fase de pre-uso representa más del 60% salvo el criterio de salud humana: partículas volátiles, y el agotamiento de combustibles fósiles. Este resultado resulta similar para el caso del primer modelo en el que la importancia de la fase uso resulta mayor a la pre-uso.



CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En el proyecto desarrollado se obtuvieron resultados para dos modelos de edificaciones de vivienda típicas de la ciudad de Lima. Los últimos años el sector construcción ha representado un crecimiento económico significativo para el Perú. Es importante poder cuantificar las implicancias ambientales de las edificaciones de vivienda durante todo su ciclo de vida. Los resultados obtenidos en este proyecto ayudan a comprender los impactos ambientales que se generan y cuál es su importancia.

A continuación, se realiza la comparación de los resultados obtenidos para ambos modelos desarrollados y los indicadores presentados en el capítulo anterior.

5.1 COMPARACIÓN POR METRO CUADRADO DE VIVIENDA

El primer indicador, es el consumo de energía primaria a través del indicador CED. Los resultados obtenidos para ambos modelos no pueden ser comparados directamente debido a la diferencia en la magnitud de las edificaciones (modelo 1: 8 pisos y 108 unidades de vivienda vs. Modelo 2: 4 pisos y 4 unidades de vivienda). La primera edificación, el modelo 1, consume 240 000 GJ de energía primaria. Por otro lado, el segundo modelo consume 42 000 GJ de energía primaria. Para realizar la comparación de ambos modelos se dividieron los resultados entre la cantidad de metros cuadrados de vivienda techada. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas del ciclo de vida mencionadas previamente.

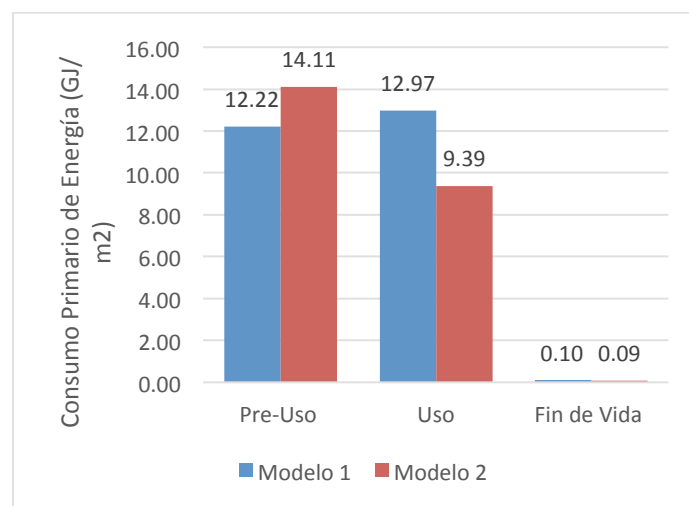


Figura 5.1 Resultados por metro cuadrado de vivienda para ambos modelos

Se pueden apreciar distintos valores por metro cuadrado para el pre-uso de las edificaciones. El primer modelo tiene un consumo de 12.22 GJ por metro cuadrado de vivienda construida, mientras que el segundo modelo consume 14.11 GJ por metro cuadrado de vivienda construida. El segundo modelo tiene un mayor consumo energético para la construcción de la vivienda que el primero. La diferencia entre ambos modelos representa el 14% de la energía.

Por otro lado, en las fases de uso y de fin de vida se invierte la importancia entre ambos modelos. La fase de uso tiene un consumo por metro cuadrado de 12.97 GJ para el modelo 1 y de 9.39 GJ por metro cuadrado de vivienda para el modelo 2. Esto se debe principalmente a que el modelo 1 tienen mayor densidad de viviendas por metro cuadrado que el modelo 2. El modelo 1 tiene un promedio de área de unidad de vivienda de 87 metros cuadrados mientras que el modelo 2 tiene un promedio de área de unidad de vivienda de 445 metros cuadrados. Los departamentos del modelo 2 tienen 5 veces más área que los departamentos del modelo 1. Esto hace que el consumo eléctrico por metro cuadrado sea mayor para el primer modelo y por ende la energía primaria consumida en el ciclo de vida sea mayor para el primer modelo.

La fase de fin de vida contempla el transporte de los materiales de demolición a un relleno sanitario. El valor por metro cuadrado nuevamente resulta mayor para el primer modelo, 0.10 GJ, que para el segundo, 0.09 GJ. Esto se debe a la mayor cantidad de desechos de demolición y la implicancia que esto tiene en la cantidad de camiones necesarios para su transporte.

Al comparar los resultados típicos en los modelos desarrollados con estudios previos se observa la similitud en los resultados. Se buscó comparar los modelos con el estudio desarrollado por García Torres de Vivienda Unifamiliar en la ciudad de Lima y con el estudio desarrollado por Bawden y Williams sobre edificaciones de Vivienda Multifamiliar en los Estados Unidos. Para el segundo estudio mencionado se compara con los valores representativos más cercanos a los modelos desarrollados en este proyecto. Para ello se utilizan los datos del estudio de Bawden y Williams para edificaciones de Concreto Armado de 4 y de 11 pisos. La edificación de vivienda unifamiliar de García Torres contaba con un área de 478 metros cuadrados. Las edificaciones de Bawden y Williams contaban con 6045 m², la edificación de 4 pisos, y 7510 m² la edificación de 11 pisos.

Tabla 5.1 Comparación resultados modelo 1 y modelo 2 con García Torres, Bawden & Williams

Resultados	Vivienda Unifamiliar	Modelo 1 (8 Pisos)	Modelo 2 (4 Pisos)	4 Pisos CA	11 Pisos CA
Área de Viviendas (m ²)	478.0	9409.3	1779.3	6045.0	7510.0
Consumo Energía Primaria (GJ/m ² de vivienda)	17.0	25.3	23.6	33.6	34.0

Como se puede observar el consumo por metro cuadrado de vivienda tiende a aumentar conforme aumenta el área de vivienda en la edificación. Por otro lado, cabe resaltar que para los valores obtenidos en E.E.U.U. en la fase de operación se considera el uso de aire acondicionado y calefacción. Este valor aumenta significativamente la importancia de la fase de uso.

En valores porcentuales, la fase de uso representa el 87% (Bawden & Williams 2014) del ciclo de vida mientras que para los modelos desarrollados representa el 51% para el modelo 1 y el 40% para el modelo 2. Por otro lado, en el estudio de García Torres la fase operacional (uso) representa el 55% de la energía primaria consumida. Se podría apreciar una tendencia al aumentar el área de la vivienda en el Perú, la fase del pre-uso tiende a cobrar mayor importancia en el ciclo de vida analizado. Además, es importante mencionar que en este estudio la fase de mantenimiento solo contempla el resane de las paredes de las edificaciones cada dos años.

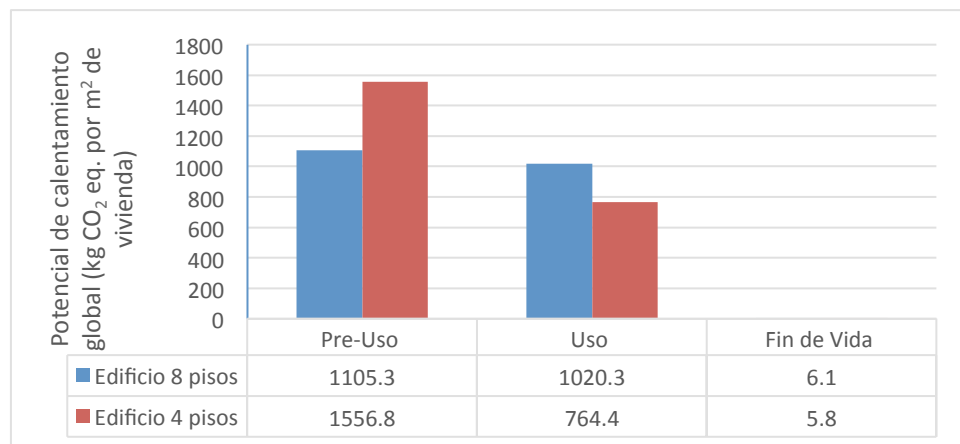


Figura 5.2 Potencial de calentamiento global (kg CO₂ eq. por m²)

Se encontraron los valores típicos para el potencial de calentamiento global por metro cuadrado de vivienda construida. Para el primer modelo se obtiene un valor total para el ciclo de vida de 2131.65 kg de CO₂ equivalentes emitidos a la atmósfera. Para el segundo modelo se obtiene un valor de 2327.02 kg de CO₂ equivalentes emitidos a la atmósfera. Los resultados resultan mayores por metro cuadrado para el segundo modelo debido a que en la fase de pre-uso se utiliza mayor cantidad de materiales energéticamente intensivos. La producción de concreto y acero conllevan a mayores emisiones de dióxido de carbono equivalentes. Por ello, como se puede apreciar en la figura 6.2 para el segundo modelo las emisiones equivalentes de dióxido de carbono son de 1556.84 kg, mientras que para el primer modelo fueron de 1105.29 kg. Esto representa una variación porcentual del 29%.

Por otro lado, en la fase de uso la situación se invierte. El primer modelo presenta emisiones de 1020.27 kg de CO₂ equivalentes para esta fase, mientras que el segundo modelo 764.37 kg. Esta variación del 25% es atribuible a la densidad de viviendas del primer modelo. El primer modelo al contar con 108 viviendas tiene un mayor consumo energético por metro cuadrado, como visto previamente (12.97 GJ/m² versus 9.39 GJ/m²), lo que genera un mayor potencial de calentamiento global por metro cuadrado construido.

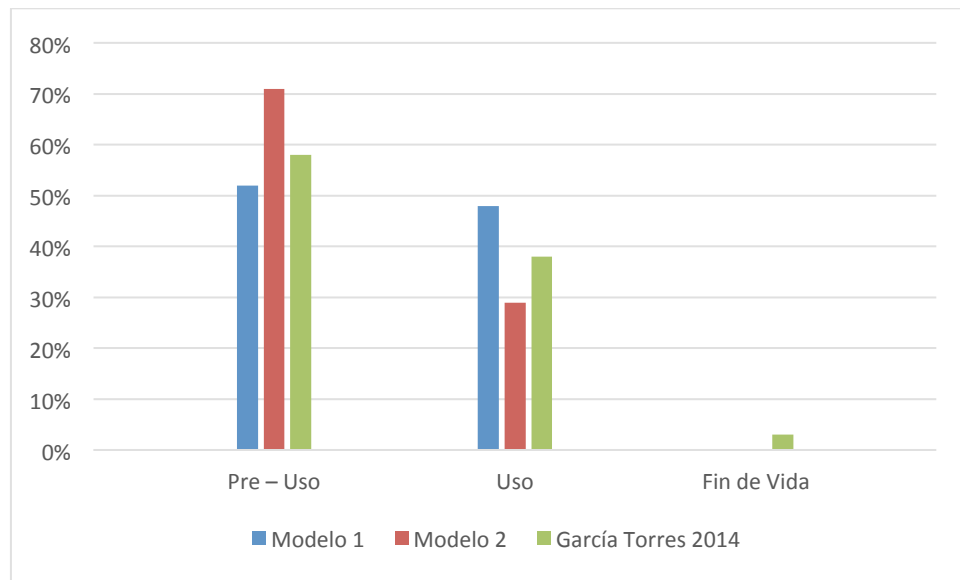
En el caso del fin de vida para ambos casos los resultados son similares. Esto se debe a que el transporte depende de la masa de los residuos los cuales son transportados análogamente. Ambos modelos tienen el mismo tipo de transporte de residuos por lo que la variación entre ambos es despreciable.

Al comparar los valores encontrados para el ciclo de vida con los de Bawden y Williams se observa similitud en los resultados. Los valores de la bibliografía se encuentran entre 2000 y 2400 kg de CO₂ equivalentes. En el caso del estudio de García Torres, el valor encontrado para metro cuadrado de vivienda construido corresponde a 993.81 kg de CO₂ equivalentes. Este valor resulta menor a los demás en mención debido a que se trata de una vivienda unifamiliar.

Para realizar la comparación con los valores de estudio de García Torres se realizará una comparación en base a porcentajes de representación de cada etapa del ciclo de vida. En la siguiente tabla (6.2) y figura (6.3) se representan los porcentajes atribuibles al potencial de calentamiento global para cada una de las fases del ciclo de vida de las edificaciones de vivienda en mención.

Tabla 5.2 Potencial de Calentamiento Global modelo 1, modelo 2 y García Torres 2014

Resultados	Modelo 1	Modelo 2	García Torres 2014
Pre – Uso	52%	71%	58%
Uso	48%	29%	38%
Fin de Vida	~0%	~0%	3%

**Figura 5.3** Potencial de calentamiento global normalizado

Se puede apreciar que la fase de pre – uso, en la que se contempla la manufactura de los materiales y la construcción in situ, es la más importante en emisiones equivalentes de dióxido de carbono para los tres tipos de edificaciones analizadas. El modelo dos, tiene un mayor valor porcentual por la cantidad de concreto que se utiliza para el uso de cuatro viviendas, por ello el valor aumenta al 71% versus el 52% del modelo 1 y el 58% de García Torres.

A continuación, se presentan dos figuras (figura 5.4 y figura 5.5) en la que se pueden apreciar dos categorías de criterio de salud humana en las que la fase de construcción tiene una gran importancia. En estas categorías: sustancias tóxicas cancerígenas y no cancerígenas, la primera etapa del ciclo de vida de ambas edificaciones representa más del 80% de los impactos totales.

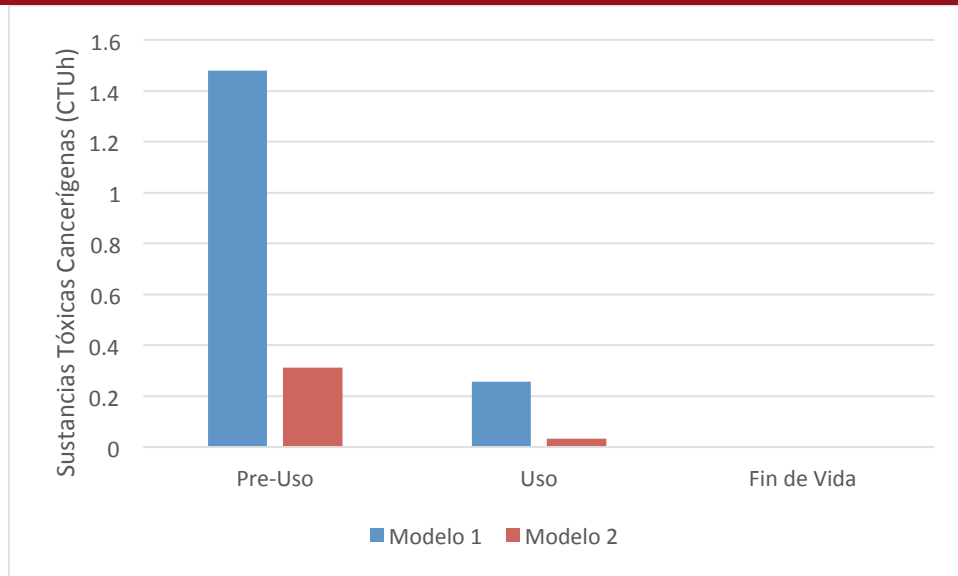


Figura 5.4 Criterio de salud humana: resultados sustancias tóxicas cancerígenas

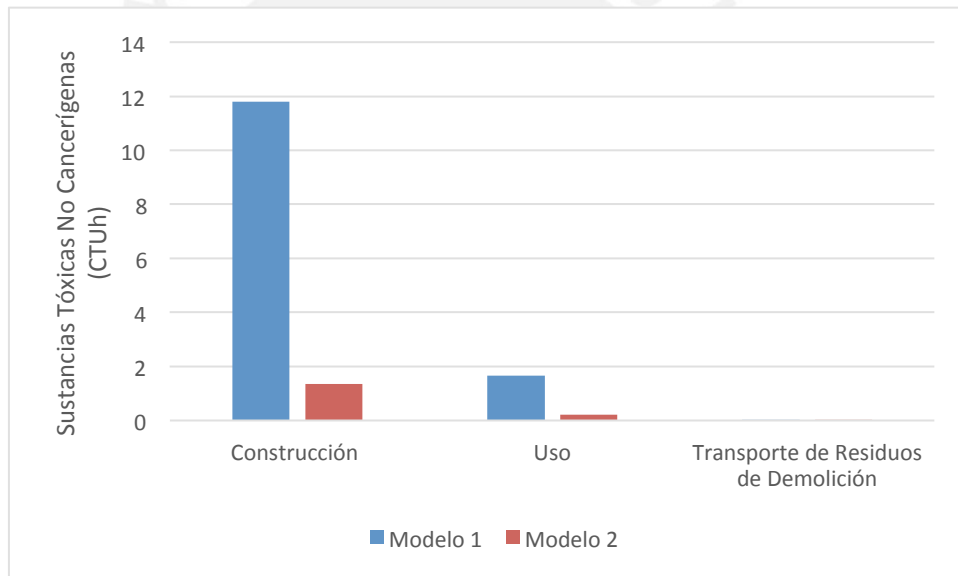


Figura 5.5 Criterio de salud humana: resultados sustancias tóxicas no cancerígenas

Para el primer modelo las sustancias tóxicas cancerígenas en la etapa de construcción resultan en un impacto de 1.48 CTUh. Este valor representa el 84.9% del impacto total del ciclo de vida. Por otro lado, el segundo modelo tiene un impacto de 0.311 CTUh con una relevancia del 90.3% del impacto total. En la categoría de sustancias tóxicas no cancerígenas se genera un mayor impacto que en la categoría anterior con 11.8 CTUh (87.3%) en la etapa de construcción del primer modelo. Para el segundo modelo se encuentra un impacto de 1.35 CTUh (85.5%). Estos valores son significativamente superiores a los de la primera categoría en cuestión (sustancias tóxicas cancerígenas).

Los materiales más utilizados en la construcción de las edificaciones mencionadas son el concreto y el acero de acuerdo a los metrados entregados por las constructoras y en los cuales están basados los modelos. En el primer modelo se utilizan alrededor de 2900 metros cúbicos de concreto premezclado para estructuras mientras que en el segundo modelo se utilizan 1200 metros cúbicos. Por otro lado, en el primer modelo se utilizan 260 toneladas de acero de refuerzo y en el segundo modelo 85 toneladas de acero.

El concreto y el acero son resultado de procesos energéticamente intensivos e intensivos en emisiones a la atmósfera. La producción de concreto premezclado global (WEIDEMA et ál. 2013) consume 2.95 GJ de energía primaria por metro cúbico de concreto. Además, la producción de concreto es altamente contaminante en términos de emisiones de partículas, 179 gramos de $PM_{2.5}$ equivalentes por metro cúbico de concreto, que pueden resultar en enfermedades para el ser humano. Como se puede denotar la categoría con mayor relevancia es la de sustancias tóxicas no cancerígenas en el pre-uso representando aproximadamente el 80% del impacto para ambos modelos. Estos resultados corresponden con lo que se esperaba en correlación a otros estudios, como el de García Torres. Este tipo de resultados respaldan la necesidad de regular con mayor exigencia la manufactura de los materiales de construcción, sobre todo en un país en boom constructivo como el Perú.

Las categorías de eutrofización y ecotoxicidad, al igual que las dos mencionadas previamente, tienen una importancia en impactos mayor al 80% para la fase de construcción nuevamente debido a la manufactura de los materiales.

Para las categorías de agotamiento de la capa de ozono, formación de smog fotoquímico, acidificación y, efectos respiratorios también se observa una predominancia de la fase de construcción en el ciclo de vida de ambos modelos. La relevancia de la fase uso del segundo modelo es ligeramente mayor al del primero debido a que en la fase de uso el segundo modelo tiene menor consumo por metro cuadrado que el primero por la menor densidad de viviendas.

5.2 COMPARACIÓN POR UNIDAD DE VIVIENDA

Los resultados de ciclo de vida presentados para las dos edificaciones estudiadas se pueden comparar utilizando una unidad funcional diferente al metro cuadrado de vivienda en 50 años de vida útil. En las edificaciones estudiadas el área de los departamentos varía notablemente entre una y otra. Como mencionado previamente, el primer modelo tiene un promedio de área de departamento de 87 m² y el segundo modelo un promedio de 445 m². Aun así, ambos departamentos cumplen con el mismo propósito: albergar a una familia en un espacio que cuenta con tres dormitorios. La gran variación en el área del departamento es debido al sector socioeconómico al que están dirigidos los departamentos de las edificaciones. El modelo 1 corresponde a un nivel socioeconómico C mientras que el modelo 2 a uno A.

A continuación, en la figura 5.6, se presentan los resultados para la energía primaria consumida por departamento típico de ambos modelos. El departamento típico es considerado como la unidad de vivienda de área promedio 87 m² para el modelo 1 y 445 m² para el modelo 2.

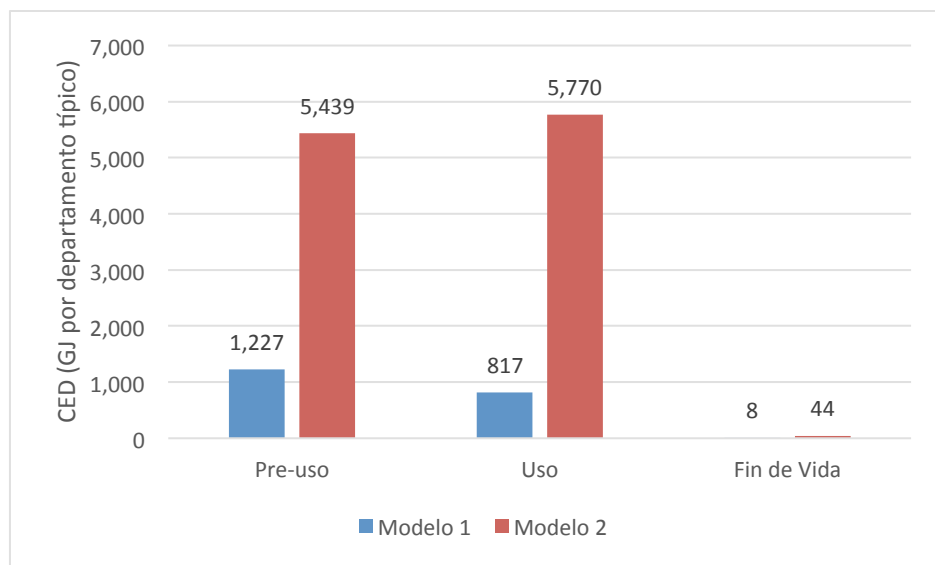


Figura 5.6 Energía primaria consumida por departamento típico

Como se puede apreciar en la figura 5.6 la diferencia entre el departamento típico del modelo 1 y el departamento típico del modelo 2 es significativa. Para la fase de pre-uso el departamento del modelo 2 consume más de 4 veces la energía primaria que el del modelo 1. Del mismo modo en la fase de uso ésta variación es aún

mayor, siendo 7 veces el consumo energético del departamento del modelo 1, el del modelo 2. El mismo patrón se cumple para la fase de fin de vida.

La mayor variación del consumo energético, en la fase de uso, se atribuye principalmente al consumo eléctrico. El departamento típico del primer modelo tiene un consumo de 278 kWh al mes y el segundo modelo un consumo de 1050 kWh. Se puede observar un patrón en el que a mayor área del departamento mayor consumo eléctrico, energético y por ende se tendrá un mayor impacto.

De igual modo se presenta en la figura 5.7 el potencial de calentamiento global por departamento típico para ambos modelos estudiados.

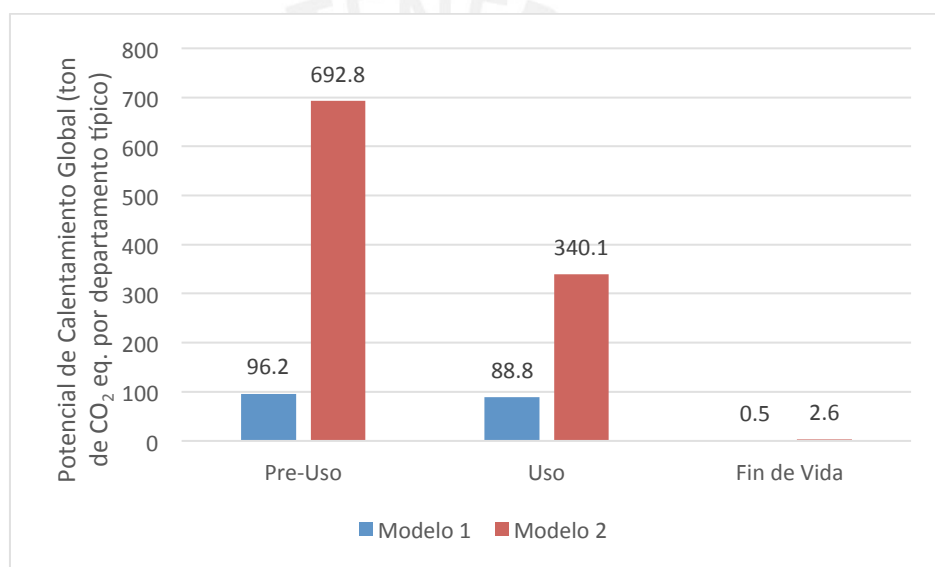


Figura 5.7 Potencial de calentamiento global por departamento típico

Nuevamente, se observa que el departamento típico del modelo 2 tiene un mayor impacto que el del modelo 1. El potencial de calentamiento global para un departamento del modelo 2 es 7 veces mayor para la fase de pre-uso, más de 3 veces para la fase de uso y casi 5 veces en la fase de fin de vida.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES

El proyecto desarrollado ayuda a tener un panorama más amplio de la realidad de la construcción de edificaciones de vivienda en el Perú. Se necesita que se desarrollen este tipo de proyectos para generar la información para la correcta implementación de políticas públicas que regulen el tema medioambiental en todo el ciclo de vida de un edificio. En los últimos años, la construcción de edificaciones de vivienda ha crecido inmensurablemente y es necesario comprender el sistema y exigir estándares que protejan el medio ambiente.

Esta investigación, estudia dos modelos de edificaciones de vivienda multifamiliares típicamente construidos en la ciudad de Lima. Los modelos desarrollados buscan complementar la información encontrada hasta el momento para el sector vivienda en el Perú.

Este estudio, a diferencia de los realizados en otros países, reflejó la importancia de la etapa de pre-uso. Esta etapa abarca principalmente la extracción de la materia prima, manufactura y construcción in situ de las edificaciones mencionadas. Para el primer modelo se halló un consumo de 2.38×10^8 MJ, o 12.22 GJ/m^2 , de los cuales el 48% fue representado por la fase de pre-uso. Por otro lado, para el segundo modelo se halló un consumo de 4.20×10^7 MJ, o 14.11 GJ/m^2 , en el que la importancia del pre-uso aumentó en relevancia al 60% del total de impacto de ciclo de vida. La variación con respecto a otros países, como E.E.U.U., en que la fase de pre-uso llega a representar menos del 10% de la energía primaria se puede atribuir al uso de sistemas de aire acondicionado y calefacción. Además, la variación entre ambos modelos es atribuible a la mayor densidad de los muros del modelo 2 por su tipo estructural. Los muros de concreto armado en el modelo 2 tienen un mayor grosor que en el modelo 1.

Adicionalmente, los resultados obtenidos por metro cuadrado totales del ciclo de vida reflejan un mayor consumo energético para el primer modelo: 25.29 GJ/m^2 de vivienda para el modelo 1 y 23.59 GJ/m^2 de vivienda para el modelo 2. Nuevamente esta variación menor al 7%, no es significativa. La densidad de viviendas, cantidad de viviendas por unidad de área, en el primer modelo es significativamente mayor que en el segundo modelo. Por lo que la variación en los resultados de un modelo al otro se puede atribuir al mayor número de viviendas por

metro cuadrado. En un área equivalente a un departamento típico del modelo 2 se pueden obtener 5 departamentos del modelo 1.

No obstante, si se consideran los resultados encontrados en la comparación por departamento típico, para ambos modelos, la diferencia en las fases de pre-uso replicable a las demás fases del ciclo de vida, sí es significativa entre un modelo y el otro. Un departamento típico del modelo 1, con un área de 87 m², consume 1,277 GJ de energía primaria en la fase de pre-uso. El departamento típico del modelo 2, con un área de 445 m², tiene un consumo de energía primaria en la fase de pre-uso de 5,439 GJ. Este último resultado para el modelo 2 representa más de cuatro veces la etapa de pre-uso del modelo 1.

Además, se observa la tendencia que a mayor poder adquisitivo, mayor área tendrá el departamento, y mayor será el consumo energético. El área del departamento típico del modelo 2, sector socioeconómico A, es más de cinco veces mayor al área del departamento típico del modelo 1, sector socioeconómico C. El consumo total de energía de un departamento típico del modelo 2 fue de 11,252 GJ. Esto representa nuevamente más de 5 veces el consumo de energía total del departamento típico del modelo 1.

Esta misma tendencia se replica a los resultados encontrados para el potencial de calentamiento global. El departamento típico del modelo 2, emite un total de 1035.5 toneladas de dióxido de carbono equivalentes, lo que representa 5.5 veces el potencial de calentamiento global total del departamento típico del modelo 1. Se puede concluir que esta tendencia será replicable en el resto de las categorías de impacto analizadas.

A partir de los resultados obtenidos, se obtiene un panorama general de la situación ambiental de las edificaciones en el Perú, específicamente en la ciudad de Lima. Existen dos sectores socioeconómicos en los que el contraste del consumo energético y el impacto ambiental es notable. El nivel socioeconómico A, que vive en departamentos, tiene un mayor consumo energético e impacto que el sector socioeconómico C que vive en departamentos. El mayor poder adquisitivo impulsa a la sociedad a la adquisición de viviendas de mayor área. Como se ha podido apreciar el área de la vivienda es el principal factor en el impacto total de la vivienda en sí. Aun cuando el modelo 1 en el análisis por metro cuadrado en la etapa de uso tiene un consumo 30% mayor que el modelo dos, al realizar el análisis por departamento típico se comprueba que los departamentos del modelo 2 tienen un

mayor consumo energético e impacto debido a su área. Los departamentos con mayor área tendrán un mayor impacto siempre y cuando los materiales de construcción y el tipo de edificación sean similares como en los casos estudiados.

Otro tema que resulta de gran importancia es la construcción informal en el Perú. Las edificaciones trabajadas no forman parte de este sector pero sería importante realizar futuros estudios en los que se contemple el tema de la “auto-construcción”. Este tipo de edificaciones son completamente diferentes a las desarrolladas en este estudio y su investigación ayudaría a dar un panorama más amplio de la realidad peruana.

Finalmente, se puede concluir que el uso de herramientas como el análisis del ciclo de vida es muy importante para comprender y obtener información acerca de los impactos ambientales de las edificaciones en el Perú. Este tipo de estudios deben de ser fomentados para poder desarrollar bases de datos propias de la industria de los materiales de construcción, y las prácticas de construcción en sí mismas. Los valores obtenidos ayudan a tener un camino por el cual ir reajustando los aspectos de la construcción de viviendas en el Perú, y una línea base por donde ir trabajando. El área de los departamentos será un aspecto esencial a ser considerado para la disminución de los impactos ambientales del sector vivienda.

BIBLIOGRAFÍA

ANDINA

2014 *Capeco: Sector Construcción crecerá más de 10% este año*. Consulta: 29 de mayo de 2014.
<http://www.rpp.com.pe/2014-04-11-capeco-sector-construccion-crecera-mas-de-10-este-ano-noticia_683876.html>

ASTM International

1991 *ASTM E1991-05 "Standard Guide for Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Building Materials/Products"*. Pennsylvania, E.E.U.U.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE

2016 Consulta: 18 de febrero de 2016.
<<http://www.athenasmi.org/what-we-do/lca-data-software/>>

BAWDEN, Kimberly y Eric Williams

2015 *Hybrid life cycle assessment of low, mid and high-rise multi-family dwellings*. Challenges. Número 6, pp. 98-116. Consulta: 15 de mayo 2015.
< www.mdpi.com/2078-1547/6/1/98/pdf>

BOB, Corneliu, Dencsak TAMAS y Liana BOB

2010 *Sustainability of Buildings*. Advances in Energy Planning, Environmental Education and Renewable Energy Sources. Consulta: 10 de mayo de 2014.
<<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tunisia/EPERES/EPERES-10.pdf>>

BILEC, Melissa, et ál.

2006 *Example of a Hybrid Life-Cycle Assessment of Construction Processes*. American Society of Civil Engineers, Journal of Infrastructure Systems, pp. 207-215. Consulta: 10 de mayo de 2014.
< <http://www.cmu.edu/gdi/docs/example-of-a-hybrid.pdf>>

BILEC, Melissa, Robert. J. RIES y Scott MATTHEWS

2010 *Life-Cycle Assessment Modeling Of Construction Processes for Buildings*. American Society of Civil Engineers, Journal of Infrastructure Systems, pp. 199-205. Consulta: 10 de mayo de 2014.
< <http://www.ce.cmu.edu/~greendesign/docs/lca-modeling.pdf>>

CURRAN, Marry Ann

2012 *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. Publicado en línea. John Wiley & Sons, pp. 1-41.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)

2006 *Life cycle assessment: principles and practice*. Consulta: 25 de octubre de 2014.
<http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)

- 2009 *Buildings and their Impact on the Environment: A Statistical Summary*. Green Building Publications. Consulta: 5 de mayo de 2014.
< <http://www.epa.gov/greenbuilding/pubs/gbstats.pdf>>
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)
- 2012 *Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI)*. Consulta: 25 de octubre de 2014. < <http://www.epa.gov/nrmrl/std/traci/traci.html>>
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)
- 2016 *Understanding Global Warming Potentials*. Consulta: 18 de febrero de 2016.
<<http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gwps.html>>
- ERLANDSSON, Martin y Mathias BORG
- 2003 *Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development need*. Building and Environment. Número 38, pp. 919-938. Consulta: 5 de mayo de 2014.
< http://www.sze.hu/~mgergo/lca-lcc/generic_LCA.pdf>
- FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO (FICEM)
- 2013 *Informe Estadístico 2013*. Bogotá. Consulta: 10 de febrero 2016.
<http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf>
- FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO (FICEM)
- 2016 *Federación Interamericana del cemento: Proceso*. Consulta: 10 de febrero del 2016.
<<http://www.ficem.org/cemento/produccion-de-cemento/proceso.html>>
- GABI SOFTWARE
- 2014 Consulta: 25 de octubre de 2014.
<<http://www.gabi-software.com/international/index/>>
- GARCIA, Samy
- 2013 *Evaluación Ambiental durante el Ciclo de Vida de una Vivienda Unifamiliar*. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- GOOGLE MAPS
- 2016 *Perú* [mapa]. Consulta: 27 de febrero 2016.
<<https://www.google.com.pe/maps/@-12.0354076,-76.9890233,11.25z>>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)
- 2014 *Serie de Cuentas Nacionales 1950-2013*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)
- 2016 *Instituto Nacional de Estadística e Informática: Estadísticas. Índice Temático*. Consulta: 10 de febrero 2016.
<<https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/sector-statistics/>>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

2007 *Synthesis Report*. Consulta: 18 de febrero 2016.
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf>

ITTEN, René, Rolf Frischknecht, Matthias Stucki

2014 *Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid Version 1.3*. treeze Ltd., Uster, Suiza. Consulta: 18 de febrero de 2016.
<<http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/itten-2012-electricity-mix.pdf>>

JUNNILA, S., A Hovarth, A. M. ASCE

2003 *Life-cycle environmental effects of an office building*. American Society of Civil Engineers, Journal of Infrastructure Systems, Número 9, pp. 157-166.

JUNNILA, S., A. Hovarth, A.A. Guggemos

2006 *Life cycle assessment of offices buildings in Europe and the United States*. The International Journal of Life Cycle Assessment, Número 8, pp. 324-330.

KAHHAT, Ramzy et ál.

2009 *Environmental Impacts over the Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall System*. American Society of Civil Engineers, Journal of Infrastructure Systems. Número 15, pp. 211 - 221.

KEOLIAN, Gregory, S. Blanchard, P Reppe

2001 *Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house*. Journal of Industrial Ecology. Volumen 4, Número 2, pp. 135 - 156.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

2014 *Balance de Energía 2012*. Ministerio de Energía Minas. Consulta: 29 de mayo de 2014.
<<http://www.minem.gob.pe>>

OCHOA, Luis, C. Hendrickson, M. ASCE, H. Scott Matthews

2002 *Economic input-output life-cycle assessment of U.S. residential buildings*. American Society of Civil Engineers, Journal of Infrastructure Systems. Número 8(4), pp. 132 – 138.

ORGANISMO SUPERVISOR DE LA INVERSIÓN EN ENERGÍA Y MINAS (OSINERGMIN)

2016 *Cómo ahorrar energía eléctrica*. Lima. Consulta: 10 de febrero 2016.
<http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Folleteria/5%20Quieres%20saber%20cuanto%20consumen%20tus%20artefactos.pdf>

ORTIZ, Oscar, Francesc CASTELLS y Guido SONNEMANN

2003 *Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*. Construction and Building Materials. Número 23, pp. 28-39. Consulta: 29 de mayo de 2014.
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807003005>>

PERIS MORA, Eduardo

2007 *Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building material*. Building and Environment. Número 42, pp. 1329 -1334. Consulta: 29 de mayo de 2014.
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305004737>>

PRÉ CONSULTANTS

2004 *Introduction to LCA with SimaPro*. Amsterdam, Holanda.

PRÉ CONSULTANTS

2013 *SimaPro Tutorial*. Amsterdam, Holanda.

PRÉ CONSULTANTS

2015a *SimaPro* [programa informático]. Versión: 8.0.5.13

PRÉ CONSULTANTS

2015b *SimaPro Database Manual: Methods Library*. Amsterdam, Holanda. Consulta: 18 de febrero 2016.
<<https://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>>

PRÉ CONSULTANTS

2016 Consulta: 2 de febrero de 2016.
<<https://www.pre-sustainability.com/about-pre>>

RAJAGOPALAN, Neethi

2011 *Residential Life Cycle Assessment Modeling for Green Buildings and Building Products*. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Pittsburg: Universidad de Pittsburg, Escuela Swanson de Ingeniería. Consulta: 5 de mayo del 2014.
< <http://d-scholarship.pitt.edu/6436/1/Rajagopalan-06042011.pdf>>

RED PERUANA DEL CICLO DE VIDA (RPCV)

2016 *Red Peruana del Ciclo de Vida: Investigación*. Consulta: 27 de febrero 2016.
<<http://red.pucp.edu.pe/cicludevida/index.php/es/que-hacemos/investigacion.html>>

RUGANI, Benedetto, Daryna PANASIUK y Enrico BENETTO

2012 *An input-output based framework to evaluate human labour in life cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment. Número 17, pp. 795-812. Consulta: 20 de noviembre 2015.
<<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-012-0403-1#/page-1>>

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (SENAMHI)

2011a *Mapa de temperatura máxima promedio estación de verano (1971-2000) – Zona costera del sur de Lima*. Consulta: 27 de febrero 2016.
<<http://www.senamhi.gob.pe/sig.php?p=021>>

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (SENAMHI)

2011b *Mapa de temperatura mínima promedio estación de invierno (1971-2000) – Zona costera del sur de Lima*. Consulta: 27 de febrero 2016.
<<http://www.senamhi.gob.pe/sig.php?p=021>>

WEIDEMA, B.P. et ál.

2013 *Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database versión 3. ecoinvent version 3*. Consulta: 12 de febrero de 2016.
<https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf>

WCED

1987 *Our Common Future*. United Nations. Consulta: 29 de mayo de 2014.
< <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>>

ZABALZA, Ignacio et ál.

2009 *Life Cycle Assessment in Building Sector: State of the Art and Assessment of Environmental Impact for Building Materials*. Symposium ELCAS, Nysiros. Consulta: 5 de mayo de 2014.
< http://circe.cps.unizar.es/enslic/texto/scientific_4.pdf>