

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS
DE VIVIENDA PROVISORIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO
DE VIDA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Ayrton Enrique Gómez Alarcón

ASESOR:

Ian Vázquez Rowe

Lima, diciembre, 2021

Resumen

El contexto global actual se caracteriza por el acelerado incremento del impacto que el ser humano tiene sobre el medioambiente, del cual una fracción importante es atribuible al sector construcción. Una de las maneras de mejorar la sostenibilidad de este rubro es mediante la aplicación una herramienta holística como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Asimismo, ya que Perú es propenso a la ocurrencia de diversos desastres naturales, el tema de la vivienda temporal de emergencia (VTE) como parte de la respuesta ante estos es un área de interés actual. Por ello, se realizó un ACV de tres modelos de vivienda provisoria elegidos bajo el supuesto de la ocurrencia de un gran sismo en la ciudad de Lima, a fin de incorporar el aspecto medioambiental a los criterios de toma de decisiones ante este tipo de emergencias. Los tres modelos de VTE escogidos para el análisis (M1 – madera machihembrada, M2 – paneles superboard, M3 – paneles SIP) corresponden a diseños empleados como parte de la respuesta ante desastres anteriores en Perú y Chile; tienen como material principal a la madera, en diversas presentaciones y como parte de otros materiales compuestos; son prefabricados, de instalación fácil y rápida; y tienen un área promedio de 18 m² y capacidad para 5 personas.

La unidad funcional definida para el ACV es 1 m² de área habitable de la vivienda durante todo su periodo de ocupación. Se analizaron las etapas de producción, construcción, uso y fin de vida. Los límites del sistema incluyen instalaciones internas sanitarias y eléctricas, pero se excluyen sus respectivas redes externas, así como el acondicionamiento del terreno en el que se realizará la construcción. La información para el inventario se obtuvo de la documentación existente de cada modelo y de la investigación del contexto particular planteado, así como de la base de datos Ecoinvent 3.6. El modelado se realizó en SimaPro 9.1, mientras que para el Análisis de Impacto se usó la metodología ReCiPe 2016 midpoint (H) v1.04 considerando las categorías de cambio

climático, agotamiento del ozono estratosférico, formación de ozono (salud humana), formación de material particulado, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, escasez de recursos minerales y escasez de recursos fósiles. Se realizó un análisis de sensibilidad evaluando siete escenarios adicionales, los cuales consideran diferentes patrones de consumo operacional de los usuarios de las VTE, así como periodos de ocupación que varían entre 6 meses y 5 años.

Los resultados del escenario base indican que la producción es la etapa más influyente en el ciclo de vida de los tres modelos, con un 84,7% del total de los impactos del ciclo de vida en promedio para todas las categorías. Asimismo, los tres modelos presentaron impactos similares para la escasez de recursos minerales, mientras que para el resto de categorías, los impactos de los modelos 1 y 2 son aproximadamente el 60% del impacto del modelo 3, salvo para el agotamiento del ozono, en el que este valor se reduce a 20%. Los mayores impactos del modelo 3 se atribuyen principalmente al uso de paneles SIP, mientras que para los modelos 1 y 2 destacan el acero, *triplax*, fibrocemento, entre otros. No se encontraron variaciones significativas en los resultados de los siete escenarios adicionales evaluados. Se compararon los resultados de potencial de calentamiento global y demanda energética operacional con otros casos de estudio similares de ACV de VTE y viviendas permanentes y se halló que, considerando los valores anuales promedio por unidad de área del ciclo de vida completo, las VTE presentan mayores impactos en casi la totalidad de los casos, lo cual fue atribuido a su relativamente corta vida útil, entre otros factores.

Se concluye que, desde el punto de vista medioambiental, los modelos 1 y 2 representan alternativas recomendables para su uso como VTE, dado el contexto definido para el estudio, debido a que los impactos de ambos son similares entre sí y significativamente menores que los del modelo 3. Sin embargo, se resalta que la decisión final debe considerar adicionalmente otros criterios sociales y económicos para poder alcanzar la solución más sustentable.

Abstract

The current global context is characterized by an accelerated increase in the impact that human beings have on the environment, of which a significant fraction is attributable to the construction sector. One of the ways to improve the sustainability of this sector is through the application of a holistic tool such as Life Cycle Assessment (LCA). Likewise, Peru is prone to the occurrence of various natural disasters, so the issue of temporary emergency housing (TEH) as part of the response to these is a current area of interest. For this reason, an LCA of three temporary housing models chosen under the assumption of the occurrence of a major earthquake in the city of Lima was carried out, in order to incorporate the environmental aspect into the decision-making criteria for this type of emergency. The three TEH models chosen for the analysis (M1 - tongue and groove wood, M2 - superboard panels, M3 - SIP panels) correspond to designs used as part of the response to previous disasters in Peru and Chile; their main material is wood, in various presentations and as part of other composite materials; they are prefabricated, easy and quick to install; and they have an average area of 18 m² and capacity for 5 people.

The functional unit defined for the LCA was 1 m² of living area of the house during its entire period of occupation. The stages of production, construction, use and end of life were analyzed. The system boundaries included internal sanitary and electrical installations, but their respective external networks are excluded, as well as the conditioning of the land on which the construction will be carried out. The information for the inventory was obtained from the existing documentation of each model and from the investigation of the particular defined context, as well as from the Ecoinvent 3.6 database. The modeling was done in SimaPro 9.1, while for the Impact Analysis the ReCiPe 2016 midpoint (H) v1.04 methodology was used considering the categories of climate change, stratospheric ozone depletion, ozone formation (human health), fine particulate

matter formation, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, mineral resource scarcity and fossil resource scarcity. A sensitivity analysis was carried out evaluating seven additional scenarios, which consider different patterns of operational consumption of TEH users, as well as occupation periods that vary between 6 months and 5 years.

The baseline scenario results indicate that production is the most influential stage in the life cycle for the three models, with 84.7% of the total life cycle impacts for the all-categories average. Likewise, the three models presented similar impacts for the mineral resource scarcity, while for the rest of the categories, the impacts of models 1 and 2 are approximately 60% of those of model 3, except for ozone depletion, in which this value is reduced to 20%. The greatest impacts of model 3 are mainly attributed to the use of SIP panels, while for models 1 and 2, steel, plywood and fiber cement stand out, among others. No significant variations were found in the results of the seven additional scenarios evaluated. The results of global warming potential and operational energy demand were compared with other similar LCA case studies of TEH and permanent housing and it was found that, in regard to the average annual values per unit area of the complete life cycle, TEH dwellings present higher impacts in almost every case, which was attributed to their relatively short lifespan, among other factors.

It is concluded that, from the environmental point of view, models 1 and 2 represent recommended alternatives for use as TEH, given the context defined for the case study, because the impacts of both are similar to each other and significantly lower than those of model 3. However, it is highlighted that the final decision must also consider other social and economic criteria in order to reach the most sustainable solution.

Agradecimientos

Este logro fue posible gracias al apoyo y motivación incondicionales de mis padres y hermana a lo largo de este periodo.

Igualmente, para mis profesores de la PUCP, por enseñarme importantes lecciones sobre la carrera y la vida, en particular a mi asesor, Ian Vázquez Rowe, por su constante orientación y total disposición para el desarrollo de esta tesis.

Muchas gracias.



Índice

Resumen	i
Abstract	iii
Índice	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	ix
Lista de acrónimos	x
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
2. Revisión de la literatura	6
2.1. Investigaciones anteriores de ACV aplicado a edificaciones residenciales	6
2.2. Investigaciones anteriores de ACV aplicado a vivienda temporal de emergencia (VTE)	16
2.3. Vivienda de emergencia como parte de la respuesta ante desastres naturales	19
2.3.1. Casos internacionales	22
2.3.2. Casos nacionales	26
3. Metodología del ACV	30
3.1. Definición de ACV	30
3.2. Fases de un ACV	31
3.2.1. Definición de objetivos y alcance	32
3.2.2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida	36
3.2.3. Análisis de Impacto de Ciclo de Vida	41
3.2.4. Interpretación de Ciclo de Vida	48
3.3. ACV aplicado a edificaciones	49
4. Caso de estudio	55
4.1. Contexto del estudio	55
4.1.1. Contexto a nivel nacional	56
4.1.2. Contexto específico en la ciudad de Lima	64
4.1.3. Escenario específico planteado	77
4.2. Selección de viviendas a analizar	80

4.3. ACV de las viviendas seleccionadas	83
4.3.1. Definición de objetivos y alcance	83
4.3.2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida	86
4.3.3. Análisis de Impacto de Ciclo de Vida	97
5. Resultados	100
5.1. Escenario base.....	100
5.2. Análisis de sensibilidad	109
5.3. Comparación con otras VTE y viviendas permanentes a nivel de Ciclo de Vida..	117
6. Conclusiones	123
7. Bibliografía	133
8. Anexos	146



Lista de figuras

Figura 1: Etapas de la respuesta ante desastres.....	20
Figura 2: Rol de la vivienda temporal en el contexto de reconstrucción.....	21
Figura 3: Transporte de cabaña de madera usada luego del terremoto de San Francisco de 1906	22
Figura 4: Exterior e interior de Casa Desmontable 6x6.....	23
Figura 5: Hidratación y elevaciones del CSS	24
Figura 6: Enfoque de vivienda progresiva	25
Figura 7: Actores institucionales y estructura del SINAGERD.....	28
Figura 8: Viviendas temporales Sencico (izq.) y USAID (der.).....	29
Figura 9: Fases principales de un ACV	32
Figura 10: Sistema de producto, entorno y límites	35
Figura 11: Procedimiento para el Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.....	37
Figura 12: Subfases del Análisis de Impacto de Ciclo de Vida.....	42
Figura 13: Indicadores midpoint y endpoint para la categoría de cambio climático	43
Figura 14: Mecanismo medioambiental de la eutrofización terrestre y acuática.....	44
Figura 15: Categorías de impacto del método ReCiPe 2016	47
Figura 16: Etapas y subetapas del ciclo de vida de una edificación	51
Figura 17: Historia de desastres naturales por tipo en Perú.....	57
Figura 18: Mapa de peligros en el Perú	58
Figura 19: Vivienda con muros de arcilla en segundo nivel.....	64
Figura 20: Zonificación sísmica y límite de inundación por tsunami en Lima	66
Figura 21: Delimitación de lotes en AA.HH. (izq.) y ruta de evacuación bajo muro de contención de piedras sueltas (der.).....	67
Figura 22: Escaleras de un AA.HH. ubicado en San Juan de Lurigancho.....	68
Figura 23: Efectos del huaico del 23 de marzo de 2015 en Chosica	69
Figura 24: Corrosión de varillas de acero de refuerzo de columna de colegio limeño.....	73
Figura 25: Estado de conservación promedio por sector urbano en Lima Metropolitana	74
Figura 26: Material de edificación promedio por sector urbano en Lima Metropolitana.....	74
Figura 27: Niveles de vulnerabilidad sintetizada de la población de Lima Metropolitana	76
Figura 28: Áreas potenciales para albergues en campamento en la ciudad de Lima.....	79
Figura 29: Límites escogidos para el sistema estudiado.....	85
Figura 30: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) por etapas del ciclo de vida, para las ocho categorías de impacto seleccionadas – Escenario base.....	108

Lista de tablas

Tabla 1: Software especializado para ACV	39
Tabla 2: Versiones de Ecoinvent 3.6 incluidas en SimaPro.....	41
Tabla 3: Software especializado para ACV de edificaciones	52
Tabla 4: Evolución de la población censada según región natural	60
Tabla 5: Ciudades más pobladas de la costa por departamento	60
Tabla 6: Material predominante en muros exteriores	62
Tabla 7: Régimen de tenencia y titularidad de la propiedad de viviendas particulares ocupadas	62
Tabla 8: Zonificación sísmica de Lima Metropolitana	65
Tabla 9: Recursos para el manejo de emergencias en Lima y su clasificación.....	71
Tabla 10: Resumen de las principales características de las viviendas analizadas	82
Tabla 11: Demandas operacionales de agua y energía eléctrica según patrón de consumo	92
Tabla 12: Matriz energética peruana para el 2016	92
Tabla 13: Escenarios alternativos evaluados.....	93
Tabla 14: Inventario de Ciclo de Vida de los tres modelos de vivienda analizados (etapas de producción, construcción y fin de vida).....	95
Tabla 15: Inventario de Ciclo de Vida de los tres modelos de vivienda analizados (etapa de uso: escenarios base y alternativos)	96
Tabla 16: Inventarios auxiliares para los modelos de vivienda analizados	97
Tabla 17: Categorías de impacto seleccionadas para este estudio	98
Tabla 18: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) expresados respecto a su análogo en el escenario base	114
Tabla 19: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) expresados respecto al modelo de mayor impacto para cada categoría de impacto y escenario.....	115
Tabla 20: Variabilidad de cada categoría de impacto para cada escenario evaluado, con respecto al escenario base, según se define al inicio de esta sección.	116
Tabla 21: Potencial de calentamiento global, demanda energética operacional y características más importantes de los casos revisados de ACV aplicado a VTE (casos por encima de la línea punteada) y vivienda permanente (casos por debajo de la línea punteada).	122

Lista de acrónimos

AA.HH. - Asentamientos Humanos	DAP - Declaración Ambiental de Productos
ACNUR - Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados	EIA - Administración de Información Energética de los Estados Unidos
ACV - Análisis de Ciclo de Vida	EPS - Poliestireno expandido
APOS - Asignación en el punto de sustitución	FAO - La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
BIM - Modelación de la Información para la Construcción	FEN - Fenómeno del Niño
CAD - Diseño asistido por computadora	FF.AA. - Fuerzas Armadas
CCS - Concrete Canvas Shelter	GM - General Motors
CENEPRED - Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres	GRD - Gestión de Riesgos de Desastres
CEPLAN - Centro Nacional de Planeamiento Estratégico	HVAC - Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado
CFC - Clorofluorocarbono	ICV - Inventario de Ciclo de Vida
CLT - Madera laminada cruzada	IFRC - Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja
CO ₂ - Dióxido de carbono	INDECI - Instituto Nacional de Defensa Civil
COEL - Centro de Operaciones de Emergencia Local	INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática
COEN - Centro de Operaciones de Emergencia Nacional	ISO - Organización Internacional de Normalización
COER - Centro de Operaciones de Emergencia Regional	LS - Límites del Sistema
CONAGERD - Consejo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres	MDI - Diisocianato de difenilmetano
DALY - Años de vida ajustados por discapacidad	MgO - Óxido de magnesio
	MINAM - Ministerio del Ambiente
	MINSA - Ministerio de Salud

MM - Escala de Mercalli modificada

MOPCH - Ministerio de Obras públicas del Gobierno de Chile

MVCS - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento

NSE - Nivel socioeconómico

OCHA - Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios

OIM - Organización Internacional para las Migraciones de las Naciones Unidas

OMS - Organización Mundial de la Salud

ONEMI - Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile

ONG - Organización no gubernamental

OSB - Tablero de viruta orientada

PBI - Producto Bruto Interno

PMA - Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas

PNP - Policía Nacional del Perú

PNUD - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PREDES - Centro de Estudios y Prevención de Desastres

PRONAA - Programa Nacional de Asistencia Alimentaria

PUCP - Pontificia Universidad Católica del Perú

PVC - Policloruro de Vinilo

RR.SS. - Rellenos sanitarios

SA - Sociedad anónima

SAC - Sociedad anónima cerrada

SEDAPAL - Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima

SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

SINAGERD - Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

SIP - Panel estructural aislante

TEL - Tetraetilo de plomo

UF - Unidad Funcional

UNICEF - Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia

USAID - Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional

USGS - Servicio Geológico de los Estados Unidos

VTE - Vivienda temporal de emergencia

1. Introducción

Corrían los felices años veinte, *the roaring twenties*, e iniciaba un periodo de prosperidad económica en varios países occidentales, entre los que estaba Estados Unidos. La población continuaba su acelerado crecimiento y, junto con ella, nuevos avances científicos eran alcanzados e inventos nuevos eran concebidos. A medida que estas innovaciones se integraban a la vida cotidiana, surgían nuevos retos tecnológicos asociados. En la relativamente joven industria automotriz, uno de estos problemas era el fenómeno conocido como detonación del motor, que se caracterizaba por ruidos molestos, sobrecalentamiento, movimientos espasmódicos y respuesta lenta, por lo que, en 1921, un equipo de investigación de la empresa *General Motors* (GM) propuso la adición de tetraetilo de plomo (TEL) a la gasolina para solucionar este problema (BBC, 2020). En los años siguientes, dado el éxito del TEL como antidetonante, este fue comercializado bajo el nombre comercial de Ethyl e incluido dentro de la gasolina, expandiendo muy rápidamente su alcance y llegando a ser usado a nivel mundial para 1945, gracias también a que permitía generar mayor potencia en los motores, entre otras ventajas (Pearce, 2017).

Por otro lado, las neveras y aparatos de aire acondicionado de la época tenían el gran defecto de usar como refrigerante a compuestos tóxicos, muy inflamables y hasta explosivos, por lo que incluso una pequeña fuga podría provocar una enfermedad grave, lesiones y, en casos extremos, la muerte (BBC, 2020). Fue a inicios de la década de 1930 que el equipo de una la empresa Frigidaire, subsidiaria de GM, sintetizó diclorofluorometano, un nuevo refrigerante estable, no inflamable y no tóxico, que recibió el nombre comercial de Freón (Pearce, 2017). Posteriormente, este compuesto fue fabricado en masa y usado durante la Segunda Guerra Mundial como propulsor para esparcir insecticidas en los cuarteles de los soldados, lo que a su vez amplió sus aplicaciones como aerosol de pinturas y desodorantes, entre otros (BBC, 2020).

Las breves historias sobre estos dos compuestos, el Ethyl y el Freón, aparentan ser inconexas; sin embargo, son similares en que gozaron de un gran éxito temprano, el suficiente como para expandir rápidamente su uso a escala global. Anecdóticamente, ambos fueron descubrimientos de la misma persona, el químico e ingeniero mecánico Thomas Midgley Jr., y, lamentablemente, fue luego de varios años de incesante producción que otros científicos empezaron a revelar los terribles daños ambientales que inadvertidamente se estaban generando (Pearce, 2017).

Por un lado, la combustión de gasolina con Ethyl liberaba a la atmósfera grandes cantidades de plomo, cuya posterior inhalación y acumulación dentro del cuerpo humano genera una serie de graves consecuencias como presión arterial alta, problemas renales, anomalías fetales y daño cerebral, afectando especialmente a los niños (BBC, 2020). En casos extremos de exposición, como a la que estuvieron sometidos los trabajadores de las fábricas de Ethyl, se pueden sufrir violentos episodios de paranoia e incluso la muerte (Pearce, 2017). Pese a la gravedad de estos hechos, no fue hasta la década de 1970 que, gracias a las investigaciones del psiquiatra H. L. Needleman, se demostró que incluso la exposición mínima a la contaminación por plomo ocasionaría en niños desórdenes intelectuales y de comportamiento y se desencadenaron medidas de seguridad medioambientales efectivas para reducir los niveles de plomo en la sangre de los niños (Romero, 2018). Una de estas medidas fue la Ley de Aire Limpio (*Clean Air Act*) adoptada en 1970 por el congreso de los Estados Unidos, que estableció un cronograma para eliminar gradualmente el uso de gasolina con plomo a nivel nacional, tendencia que fue extendiéndose posteriormente hacia la mayoría de países del mundo (EIA, 2020).

Por su parte, gracias al trabajo de los investigadores M. J. Molina y F.S. Rowland, en 1974 se supo que el Freón, ahora conocido como el primer clorofluorocarbono (CFC), era susceptible a descomponerse en la estratósfera superior, destruyendo la capa de ozono de la Tierra, lo cual

catalizó la adopción de acuerdos internacionales como el Protocolo de Montreal de 1987, que limitó sustancialmente la producción de CFC (BBC, 2020).

Sucesos como los previamente descritos nos dejan una importante lección: resulta imperativo aplicar un enfoque holístico para la resolución de los diferentes problemas contemporáneos, verificando que las soluciones planteadas no creen problemas nuevos en otros lugares o en el futuro. Esta afirmación cobra mayor validez en el contexto global del siglo XXI debido al sostenido crecimiento de la población mundial y su consecuente incremento del impacto que la raza humana tiene sobre el medioambiente. En la actualidad, el ritmo de consumo mundial de recursos naturales es tal que errores como la acelerada expansión del uso de Ethyl y Freón sin evaluar adecuadamente sus efectos en otros ámbitos ahora resultan simplemente inaceptables.

Asimismo, hoy en día una fracción importante de los impactos ambientales negativos causados por el ser humano es atribuible al sector construcción. Este es responsable, por ejemplo, del 36% del consumo final de energía junto con el 39% de las emisiones de CO₂ relacionadas a nivel global (Monteiro, Freire, & Soares, 2021). En Perú, además, este rubro cumple un importante rol en la economía, el cual se evidencia en su participación del 5,6% en el índice de producción nacional a noviembre de 2020, que también conlleva un consumo sustancial de recursos naturales y potenciales daños al ambiente (MVCS, 2020).

Una de las maneras de incrementar la sostenibilidad de este sector es mediante la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que, sintetizando la definición dada en la norma ISO 14040:2006, es una compilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos potenciales relevantes de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida y puede usarse para aumentar la eficiencia en el

uso de recursos y para mitigar los impactos ambientales de las edificaciones a lo largo de cada etapa de su ciclo de vida (ISO, 2006a; Petrovic, Myhren, Zhang, Wallhagen, & Eriksson, 2019).

Motivado en los hechos mencionados y en que Perú es un país propenso a la ocurrencia de diversos desastres naturales, donde el tema de la vivienda temporal de emergencia como parte de la respuesta ante estos es un área de interés actual, se realizó un ACV de tres modelos de vivienda provisoria escogidos bajo el supuesto de la ocurrencia de un gran sismo en la ciudad de Lima. De esta manera, se aplicó un enfoque integral para corroborar que las soluciones que actualmente se plantean a una de nuestras necesidades actuales no generen nuevos problemas, como sucedió anteriormente con el Ethyl y el Freón.

Asimismo, en los capítulos siguientes, para cuantificar el tamaño de los terremotos que se mencionan, se ha empleado la escala de magnitud de momento (M_w). Esta escala es particularmente precisa para sismos grandes y se basa en la estimación del momento sísmico, que es una cantidad física proporcional al área de ruptura y al deslizamiento relativo de la roca a lo largo de la falla, y que está relacionada a la energía total liberada por el sismo (USGS, 2018b).

1.1. Objetivos

El objetivo general del presente estudio es evaluar y comparar el impacto ambiental de tres alternativas de vivienda provisional mediante el empleo del Análisis de Ciclo de Vida. Se pretende que la información resultante sea útil para incorporar el aspecto medioambiental a los criterios de toma de decisiones ante emergencias. Para dicho fin se apoya en los siguientes objetivos específicos:

- Hacer un reconocimiento general de la situación actual peruana en cuanto a respuesta ante desastres naturales, identificando estrategias de manejo.

- Investigar estrategias usadas en el extranjero ante la necesidad de vivienda de emergencia.
- Proponer alternativas de vivienda temporal para su uso ante un eventual sismo en Lima.
- Aplicar la técnica ACV y el software SimaPro para cuantificar el impacto ambiental de las alternativas de vivienda temporal.
- Establecer conclusiones en base a los resultados del ACV obtenidos y compararlas con trabajos similares de ACV aplicado a edificaciones.

Para cumplir con lo anterior, este trabajo se organizó en seis capítulos. En el capítulo 1, se presentaron la motivación y los objetivos del estudio. Luego, en el capítulo 2, se hace una revisión de la literatura, mencionando casos de otros estudios de ACV en edificaciones y estrategias para la respuesta ante desastres naturales usadas en el extranjero y en Perú. Posteriormente, en el capítulo 3, se abarca en profundidad en qué consiste el ACV, qué fases tiene, sus aplicaciones y metodología, con énfasis en el caso especial que es el ACV aplicado a edificaciones. Más adelante, en el capítulo 4, se describe y justifica el contexto planteado para el estudio, junto con la elección de los modelos de viviendas analizados y se les aplica el ACV propiamente dicho. A continuación, en el capítulo 5, se presentan, discuten y comparan los resultados obtenidos y, finalmente, en el capítulo 6, se establecen las conclusiones y recomendaciones.

2. Revisión de la literatura

A continuación, se revisan investigaciones pasadas del ámbito internacional, latinoamericano y peruano que aplican el ACV para el rubro general de edificaciones del sector residencial, y más específicamente, para casos concretos de vivienda temporal de emergencia (VTE). Posteriormente, se explica este último concepto como parte de la respuesta ante desastres naturales y se recopilan diversos casos de aplicación de la misma.

2.1. Investigaciones anteriores de ACV aplicado a edificaciones residenciales

Zabalza Bribián y colegas (2009) estudiaron una vivienda unifamiliar de dos pisos con sótano y terraza, de 222 m² de área total y 107,6 m² de área habitable, ubicada en Zaragoza, España, con clima severo durante verano e invierno. La vivienda tiene una estructura de concreto armado y muros internos de ladrillo, además de estar equipada con sistemas de aire acondicionado y calefacción apoyada por una instalación solar termal. Para su análisis definieron como unidad funcional a 1 m² de área habitable durante 1 año y consideraron una vida útil de 50 años para la vivienda. Como parte del alcance se incluyeron las etapas de extracción de materias primas, transporte a fábricas, manufactura y consumo de energía operacional y seleccionaron las categorías de consumo de energía primaria y emisiones de CO₂. Para la elaboración del inventario emplearon la base de datos BEDEC desarrollada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, mientras que para el cálculo del consumo energético se basaron en simulaciones realizadas con el software CALENER VYP. Se halló que la etapa de uso es responsable del 69% del consumo total de energía primaria y del 59% de las emisiones totales de CO₂ de la vivienda. A su vez, más del 70% de estas cantidades son atribuibles a la calefacción. Asimismo, se pudo calcular que el impacto acumulado de la etapa de uso igualó al de la etapa de preuso luego de 23 y 35 años para la energía primaria y las emisiones de CO₂, respectivamente. Posteriormente, se analizó el efecto de

incrementar el grosor de la capa aislante de EPS (poliestireno expandido) de los muros, encontrándose que un progresivo aumento del aislamiento es inicialmente beneficioso pero contraproducente en exceso, con diferentes puntos de inflexión para cada categoría. Por último, comparando el sistema inicial y uno alternativo con diferente sistema de calefacción, se demuestra que pueden existir casos contradictorios en los que una vivienda mejor clasificada según su certificación energética puede generar más emisiones de CO₂ y consumir más energía primaria, hecho que resalta la importancia de incorporar el enfoque de ciclo de vida a los sistemas de certificación energética europeos (Zabalza Bribián et al., 2009).

Petrovic y colegas (2019) analizaron una vivienda unifamiliar de dos pisos y 180 m² de área construida ubicada en Suecia. El material predominante es la madera en forma de paneles, marcos y láminas cruzadas (CLT) y el equipamiento incluye sistemas de calefacción, ventilación y paneles solares. La unidad funcional escogida fue 1 m² de área habitable durante 1 año, considerando una vida útil de 100 años. Para este ACV se consideraron todas las etapas del ciclo de vida de la edificación y las categorías de calentamiento global y consumo de energía primaria. Para el cálculo del consumo energético se realizó una simulación usando el software TMF Energy 7.11 mientras que para el análisis de impacto se empleó One Click LCA, cuya base de datos recopila información de múltiples declaraciones ambientales de productos (DAP). Como resultados principales se resaltan los aportes de las etapas de producción y de uso al total de emisiones de carbono, con 30% y 64%, respectivamente, mientras que las etapas de construcción y fin de vida impactan de forma mínima. Además, se logró identificar al concreto y al sistema de paneles solares como los productos con mayores emisiones asociadas de CO₂-equivalente. Por otro lado, gracias a que la matriz energética de Suecia se basa mayoritariamente en energía hidroeléctrica y nuclear, las emisiones

de CO₂-eq relativas al consumo eléctrico operacional representan solo el 21% del total, valor relativamente bajo (Petrovic et al., 2019).

Por su parte, Kylili y colegas (2017) realizaron el ACV de una vivienda pasiva unifamiliar de dos pisos y 185 m² ubicada en Nicosia, Chipre, con clima subtropical. Entre las ventajas de una vivienda pasiva estandarizada se encuentran el diseño bioclimático, el aislamiento avanzado, la incorporación de sistemas de recuperación de calor y los altos niveles de hermeticidad. La unidad funcional escogida fue 1 m² de área útil, para facilitar la comparación con otros estudios similares. El tiempo de vida útil de la vivienda fue estimado en 50 años. Asimismo, se empleó el software EcoHestia, que usa información representativa de la producción local chipriota y a su matriz energética insular; la metodología CML 2001 (CML, 2016) para el análisis de impactos; y el Paquete de Planificación para Casas Pasivas para estimar el consumo eléctrico de la vivienda. Como hallazgos, se identificó al concreto como el material empleado con más impacto en todas las categorías, con excepción del potencial de acidificación, resultado atribuible a su manufactura energéticamente intensiva, y a la gran cantidad de este material que se usa en la vivienda. Adicionalmente, se investigó el efecto de variar el espesor de los aislamientos de lana mineral y de poliestireno, encontrándose que un aumento de estos ocasiona que el ratio entre energía operacional y energía usada en la producción decrezca significativamente, de 31,6% a 8,3% y de 16,7% a 3,6%, respectivamente para cada tipo de aislamiento (Kylili et al., 2017).

La influencia de aspectos como la orientación solar, el tamaño y la posición de las ventanas y la forma del edificio sobre los impactos de las viviendas a lo largo de su ciclo de vida fue estudiada por Monteiro et al. (2021). El sistema de estudio consiste en una vivienda unifamiliar de 133 m² ubicada en Portugal con estructura de concreto armado. Se consideran tres escenarios en los que se varía la forma del edificio manteniendo constante su área y volumen interior, que a su vez se

combinan con cuatro distribuciones y tamaños distintos de ventanas y ocho posibles orientaciones. Para poder comparar los distintos escenarios, se optó por definir como unidad funcional al edificio completo durante toda su vida útil (50 años). Se incluyeron dentro del alcance las etapas de extracción de materias primas, manufactura, transporte, construcción, mantenimiento, reparación y energía operacional, considerando solo los requerimientos energéticos de calefacción y ventilación para esta última, dado que son directamente afectadas por las opciones de diseño bajo estudio. Para el cálculo del consumo eléctrico se usó la herramienta de simulación termal DesignBuilder v3.0; para la elaboración del inventario, la base de datos EcoInvent 3.2; y para el análisis de impacto, las metodologías CML 2001 y CED (EcoInvent, 2013). Como resultados se obtuvo que las viviendas con una mayor proporción de ventanas a muros son más sensibles a la orientación y usan más energía para la ventilación, mientras que ahorran en la calefacción; que el ratio óptimo ventanas-muros oscila entre 8-15% para la mayoría de orientaciones; que la energía operacional puede tener variaciones de hasta 22% según la orientación y 58% según la forma del edificio; y se pudo identificar una combinación específica de las tres variables con el menor impacto en todas las categorías, a excepción del potencial de agotamiento de ozono para una de sus orientaciones (Monteiro et al., 2021).

En cuanto a estudios de comparación entre alternativas, Li y Froese (2016) analizaron tres alternativas de envolvente para una vivienda eficiente de bajo costo de dos pisos ubicada en Canadá. La unidad funcional escogida fue el conjunto de techo, muros externos y piso que garantizan un nivel determinado de confort termal durante 50 años. Se consideraron como opciones a envolventes basadas en I) paneles SIP tradicionales, II) paneles SIP hechos con planchas de óxido de magnesio (MgO SIP) y III) marcos de madera estructural con aislamiento de fibra de vidrio. Se incluyen dentro del análisis las etapas de extracción de materias primas, manufactura, transporte,

construcción y energía operacional de iluminación, calefacción y ventilación. Se empleó el software GaBi 6 (Sphera Solutions, 2021) y la metodología de impacto CML 2001. Para evaluar la influencia de la etapa de transporte, como escenario adicional se planteó un caso hipotético en el que los paneles MgO SIP son producidos localmente y no en China, como sucede en la realidad. Los materiales y procesos con mayor impacto fueron los tableros OSB y las planchas de EPS, que son parte de los paneles SIP; la fibra de vidrio; y el transporte marítimo desde China a Canadá. Este último fue un factor determinante en las categorías de calentamiento global, acidificación y eutrofización. Asimismo, la alternativa de marcos de madera presentó menores impactos en todas las categorías a excepción del agotamiento del ozono y toxicidad humana, resultado que fue atribuido a que la prefabricación de los tableros OSB para los paneles SIP implica una cantidad mayor de transporte y al empleo de cera de parafina dentro de su proceso de producción. Pese a esto, se resalta que los paneles SIP reducen la pérdida de calor, por lo que su uso podría ser más ambientalmente amigable que los marcos de madera en una ciudad con una matriz energética fuertemente basada en fuentes no renovables como el carbón y el gas natural, además de que tienen mayor potencial de ser reutilizados, factor que no fue tomado en cuenta para este estudio (Li & Froese, 2016).

La influencia de la cantidad de habitantes por vivienda fue investigada por García y Navarro (2012), quienes evaluaron tres viviendas, dos unifamiliares y una multifamiliar, de diferentes materiales y en diferentes ciudades de España, considerando como unidad funcional a una persona viviendo en condiciones de confort estándar según la norma de edificación española durante un año. Las etapas de extracción de materias primas, manufactura, transporte, construcción, mantenimiento, reparación, deconstrucción y reciclaje fueron incluidas dentro de los límites del sistema y, notablemente, se omitió la etapa de operación con el fin de que los resultados sean

comprendidos con mayor facilidad. Para la elaboración del inventario se emplearon las bases de datos Ecoinvent V2, IVAM, BUWAL 250, IDEMAT 2001 y LCA food DK, mientras que para el análisis de impacto se utilizaron las metodologías CML 2001 y CED. Fruto de este trabajo se estableció que el empleo de madera como material de construcción tiende a causar impactos menores en la mayoría de categorías; sin embargo, la optimización del uso de materiales alcanzada por una vivienda multifamiliar, incluso si utiliza materiales de mayor impacto como el concreto armado, puede influir en mayor medida en la mitigación de los diferentes impactos ambientales negativos. Asimismo, se resaltó la importante contribución del transporte de materiales hacia el sitio de construcción, tomando como ejemplo la eutrofización, en la que el 35% del impacto total es atribuible a esta etapa (García & Navarro, 2012).

El empleo del ACV en conjunto con otras técnicas fue ejemplificado por Balasbaneh y colegas (2019), quienes lo complementaron con un estudio de Costo de Ciclo de Vida para evaluar la reparación frente a daños por inundaciones de cinco sistemas estructurales, junto con los muros internos y externos, de una vivienda de 1 piso y 115 m² ubicada en Kuantan, Malasia. Las alternativas analizadas emplean como respectivos materiales principales ladrillos de arcilla, bloques de concreto, marcos de acero, madera y concreto prefabricado. La unidad funcional escogida fue la el sistema estructura-muros de las viviendas, con un periodo de ocupación de 50 años, incluyendo escenarios de ocurrencia de una inundación leve y otra mayor en el transcurso de su uso, adicionalmente al caso sin inundación. Se consideraron las etapas de producción, construcción, transporte, mantenimiento, reparación y fin de vida. Asimismo, se empleó el software SimaPro (PRé, 2020b) y las bases de datos Ecoinvent y Malaysia Life Cycle Inventory Database. El ACV estuvo enfocado en la categoría de cambio climático y usó la metodología IPCC 100 años. Se determinó que para los escenarios sin inundación y con inundación leve, la vivienda a base de

madera es la que implica un menor potencial de calentamiento global; sin embargo, para el escenario de inundación mayor, la mejor opción desde el punto de vista medioambiental es la de concreto prefabricado. Este resultado es consecuencia de la alta vulnerabilidad de la estructura de madera frente a inundaciones mayores, la cual eleva considerablemente las emisiones de CO₂-eq de su etapa de reparación, mientras que el concreto prefabricado es una de las alternativas menos afectadas y con resultados más estables. En cuanto al aspecto económico, la vivienda de madera pasa de ser la más barata del grupo, en el escenario sin inundación, a ser la opción más cara para el caso de inundación mayor. Por último, al ponderar ambos criterios y los tres escenarios de inundación, se escogió a la vivienda de ladrillos de arcilla como la más óptima en términos de sostenibilidad, en gran medida gracias a la poca incidencia de las reparaciones adicionales en las emisiones y costo asociados a dicha vivienda (Balasbaneh et al., 2019).

En cuanto a estudios desarrollados en Latinoamérica, se tiene el ACV de comparación ejecutado por Soust-Verdaguer y colegas (2020), que incorporaron el uso de modelos BIM a su metodología. Las viviendas unifamiliares a evaluar se ubican en Uruguay y fueron I) casa de 57 m² con muros portantes de ladrillo, cimentación de concreto y techo compuesto por armaduras de acero, y II) casa de 63 m² con muros, cimentaciones y techo de madera, ambas viviendas de tres dormitorios y un solo nivel. La unidad funcional seleccionada fue 1 m² de área de calefacción y la vida útil de las viviendas fue estimada en 60 años. Dentro del alcance se incluyeron las etapas de extracción de materias primas, manufactura, transporte, construcción, mantenimiento, reparación, reemplazo, uso de energía operacional, deconstrucción, transporte de residuos y disposición final. Se empleó la base de datos Ecoinvent 2.0 y la metodología CML 2001. La lista de cantidades de los materiales para el inventario fue extraída de un modelo BIM de cada vivienda y complementada con información adicional, especialmente para las etapas de transporte, uso y fin de vida. En este

estudio particular, la vivienda de madera produjo menos impactos en todas las categorías a excepción del potencial de eutrofización. Asimismo, para ambas viviendas la etapa de consumo de energía operacional fue la que representó mayores impactos en todas las categorías. La etapa de mantenimiento resultó especialmente relevante para la vivienda de madera considerando las categorías de ecotoxicidad de agua dulce y agotamiento del ozono, lo cual puede explicarse parcialmente por el repintado de muros internos y externos que sucede 7,5 veces durante todo el ciclo de vida. Se resalta también la poca contribución de la etapa de transporte al sitio de construcción para ambas viviendas, pese a que otros estudios subrayan a esta etapa como relevante para evaluar los beneficios ambientales de las construcciones de madera (Soust-Verdaguer et al., 2020).

En cuanto a estudios desarrollados en Perú, García (2014) analizó una vivienda unifamiliar de tres pisos, con 478 m² de área, perteneciente al NSE A, ubicada en Lima, distrito de San Isidro, con sistema estructural de placas de concreto armado. La unidad funcional escogida fue la edificación completa y se consideró una vida útil de 50 años. Se incluyeron en el alcance del proyecto las etapas de manufactura, construcción, mantenimiento, operación y fin de vida. Para la etapa de uso se realizó una simulación energética con el software eQuest, mientras que para el análisis de impacto se empleó Athena Impact Estimator for Buildings (Athena SMI, 2011). Como resultados principales se obtuvo que, para las categorías de eutrofización, formación de smog, generación de desechos, consumo de recursos y criterios de salud humana, la etapa con mayores impactos es la de manufactura, mientras que, para las categorías de calentamiento global, consumo de energía primaria, consumo de combustibles fósiles y acidificación, son las etapas de manufactura y operación las que tienen una contribución mayor. En todos los casos, la etapa de fin de vida tuvo aportes mínimos. Asimismo, se resaltó el elevado consumo energético inherente a la manufactura

de algunos materiales, como el cemento, que es uno de los constituyentes principales de la vivienda estudiada (García, 2014).

Por su parte, Cáceres (2016) realizó un ACV comparativo de dos viviendas multifamiliares, la primera de 8 pisos, 9 409 m², 108 dptos., NSE C y sistema estructural de muros de ductilidad limitada; y la segunda de 4 pisos, 1779 m², 4 dptos., NSE A y sistema estructural dual de concreto armado, ambas ubicadas en la ciudad de Lima. La unidad funcional escogida para esta comparación fue el m² de vivienda, considerando una vida útil de 50 años. Se analizaron las etapas de extracción de materias primas, transporte a fábricas, manufactura, construcción, mantenimiento, consumo de energía operacional y transporte de residuos de demolición. Cabe resaltar que los ascensores no fueron incluidos del análisis. Se emplearon la base de datos Ecoinvent, el software SimaPro y las metodologías de impacto TRACI 2.1 y CED. Los resultados obtenidos indican que las categorías de consumo de energía primaria, calentamiento global, agotamiento del ozono, formación de smog, acidificación y consumo de combustibles fósiles presentan tendencias similares, con contribuciones muy similares para las etapas de preuso y uso, para el modelo 1, y ligeramente menos similares, para el modelo 2. En cambio, para las categorías de eutrofización, ecotoxicidad y sustancias cancerígenas, la etapa de preuso es responsable de aproximadamente el 85% de los impactos, en ambos casos. Para todas las categorías, la contribución de la etapa de fin de vida es despreciable. Asimismo, se encontraron diferencias significativas al comparar los impactos de los modelos por unidad de vivienda. Por ejemplo, se halló que los impactos del modelo 2 son entre 4 y 7 veces mayores a los del modelo 1, considerando las etapas de consumo de energía primaria y calentamiento global, lo cual evidencia un mayor consumo eléctrico de la vivienda del NSE A, frente a la del NSE C, atribuible a la disparidad en las áreas de cada vivienda (Cáceres, 2016).

Por último, Corzo (2016) realizó un ACV para una vivienda unifamiliar de dos pisos y 130 m² ubicada en la ciudad de Huancayo. La vivienda tiene un sistema estructural aporricado de concreto armado y se evalúan dos alternativas para la tabiquería: bloques de concreto y ladrillos de arcilla. La unidad funcional es la edificación completa y se considera una vida útil de 50 años. Se incluyen dentro del análisis las etapas de suministro de materias primas, transporte, manufactura, construcción, mantenimiento, operación, demolición y transporte de residuos. Los resultados indican contribuciones similares entre las etapas de preuso y uso para las categorías de consumo de energía primaria, calentamiento global, acidificación marina y consumo de combustibles fósiles, mientras que, para las categorías de formación de smog, efectos sobre la salud humana y eutrofización, la etapa de preuso es marcadamente más influyente que la de uso. La contribución de la etapa de fin de vida a los impactos totales fue mínima para todas las categorías, excepto para la eutrofización y la formación de smog, donde aportó aproximadamente el 10% de los impactos ambientales. Asimismo, se resalta que, para el sistema de tabiquería, la utilización de ladrillos de arcilla, en comparación a bloques de concreto, ocasiona reducciones en el impacto de todas las categorías de impacto, del orden de 10% (Corzo, 2016).

Los casos de estudio anteriormente citados denotan una gran variedad en ciertas características de las viviendas analizadas, tales como su área y los materiales de construcción empleados, así como el empleo de distintas herramientas y metodologías de impacto. Por otro lado, aspectos como la vida útil de las viviendas, que suele ser 50 años, y la unidad funcional, que casi siempre es la edificación completa o 1 m² de ella, son mucho menos variables. Con respecto a las etapas del ciclo de vida de las edificaciones consideradas para los análisis, las etapas de construcción y producción son frecuentemente estudiadas de forma íntegra; en cambio, para la etapa de uso, los investigadores suelen enfocarse en las subetapas de mantenimiento y uso de energía operacional, mientras que

para la etapa de fin de vida, se enfatizan las subetapas de deconstrucción y transporte de residuos, lo cual puede observarse también en la **Tabla 21**. Por último, se resalta que para cada investigación se logró identificar con éxito qué materiales o etapas del ciclo de vida son responsables de los mayores impactos, información indispensable para un eventual proceso de mejora en el aspecto medioambiental.

2.2. Investigaciones anteriores de ACV aplicado a vivienda temporal de emergencia (VTE)

Seike y colegas (2019) realizaron un ACV de tres tipos de VTE usados por los damnificados del terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011. La estructura principal de dos de los modelos estudiados está compuesta por marcos de acero, mientras que la restante utilizó marcos de madera. Estas viviendas tienen un área de 29,7 m² y usan diferentes combinaciones de yeso, poliestireno, polietileno, asfalto, acero, madera, fibra celulosa, fibra de vidrio y concreto reforzado con fibras para conformar sus respectivos pisos, muros, techos, capas aislantes y coberturas. La unidad funcional seleccionada fue 1 m² de área construida y se consideraron periodos de uso de las viviendas de 2, 5 y 7 años. El análisis se centró en la emisión de gases de efecto invernadero y se incluyeron las etapas de extracción de materias primas, manufactura, transporte a obra, consumo de energía operacional y transporte, procesamiento y disposición de desechos. Para la elaboración del inventario se empleó la base de datos IDEA v2.2 desarrollada por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada de Japón. Para evaluar el efecto positivo del reúso de materiales, se añadió un escenario adicional que lo considera para una de las viviendas con marcos de acero. Entre los hallazgos principales, se estableció que la etapa de uso fue la más significativa para todos los modelos y escenarios analizados, mientras que la etapa de fin de vida tiene contribuciones mínimas al total de emisiones. Para el escenario de 2 años, la alternativa con

menores impactos fue la vivienda de marcos de acero que considera reuso de materiales; en cambio, para los escenarios de 5 y 7 años, la vivienda de marcos de madera fue, por un pequeño margen, la más ecoamigable de todas. Por ello, una de las recomendaciones de los autores para el suministro de viviendas de emergencia es que se establezca un sistema capaz de repartir las viviendas necesarias según su periodo esperado de uso (Seike et al., 2019).

Otro estudio de interés es el de Hosseini y colegas (Hosseini, Farahzadi, & Pons, 2021), quienes combinaron la aplicación simplificada del ACV con una evaluación económica y de variados criterios sociales para definir y comparar un índice de sostenibilidad de seis configuraciones distintas de VTE usadas luego del terremoto de Bam, Irán en 2003. El modelo de vivienda base tiene una estructura de marcos metálicos, muros de albañilería de concreto y una cobertura de acero galvanizado corrugado para el techo. Las configuraciones estudiadas combinan viviendas con una planta de 20 m² que pueden ser de uno o dos pisos con distribuciones aisladas, unifamiliares y semiseparadas. Entre los criterios sociales están el tiempo de construcción, el confort térmico, la acústica y la aceptación de la vivienda por parte de la población afectada por el desastre. Para el aspecto medioambiental, se cuantificó la cantidad de desechos de construcción generados a lo largo de todo el ciclo de vida de las viviendas y se realizó un ACV enfocado en la energía consumida y las emisiones de CO₂-eq con el uso la edificación completa durante 50 años como unidad funcional. Se optó por considerar este periodo debido a que se observó que la población afectada permaneció en las viviendas temporales por más tiempo de lo inicialmente planeado por las autoridades. Se incluyeron dentro del análisis las etapas de manufactura, construcción, operación y demolición. Se halló que la vivienda semiseparada de dos pisos es la que menos energía consume durante todas las etapas de su ciclo de vida, en gran medida gracias a su desempeño térmico superior que le permite conseguir ahorros energéticos significativos. Análogamente, esta configuración es la que

resulta en menores emisiones de CO₂-eq, siendo la configuración aislada de un solo piso el caso opuesto, con el mayor consumo de energía y emisiones. Finalmente, se determinó que la alternativa con mayor índice de sostenibilidad puede ser la vivienda semiseparada de un piso o la de dos pisos, dependiendo de la ponderación de los aspectos medioambiental, social y económico, mientras que la vivienda aislada de un piso resultó la menos sustentable en todos los escenarios analizados (Hosseini et al., 2021).

Por su parte, Atmaca y Atmaca (2016) desarrollaron un Análisis Energético de Ciclo de Vida y Análisis de Costo de Ciclo de Vida aplicados a dos tipos de VTE típicas de la ciudad de Gaziantep, Turquía. El primer modelo tiene un área de 70 m² y consiste en una estructura de perfiles de acero, muros de paneles de concreto prefabricado, aislamiento de fibra de vidrio y cimentación de concreto, mientras que la segunda alternativa está basada en el reúso de un contenedor de acero de 20 m², con aislamiento de fibra de vidrio y paneles de drywall. Ambos modelos emplean paneles OSB como parte del techo. La unidad funcional seleccionada fue 1 m² del área de las viviendas considerando una vida útil de 15 años, resaltando el hecho de que para ambos casos se supuso un total de cuatro habitantes por vivienda, pese a la diferencia de áreas. Se incluyeron en los límites del sistema las etapas de extracción de materias primas, manufactura, construcción en sitio, operación, demolición, reciclaje y disposición final. Para el cálculo de requerimientos de energía primaria se utilizó la base de datos Inventory of Carbon and Energy v2.0 y se consideraron las demandas de sistemas HVAC, iluminación y electrodomésticos. Los resultados obtenidos indican que la etapa de operación representa entre 82,4-83,2% del total de la energía requerida durante todo el ciclo de vida de las viviendas. Asimismo, la alternativa del contenedor tiene una demanda total de 24,7 GJ/m², mientras que el modelo con muros de concreto prefabricado solo necesita 18,5 GJ/m². En cuanto al aspecto económico, para ambas viviendas, la etapa de construcción, que

incluye la adquisición de todos los materiales iniciales, es la de mayor costo con 42-51% del total del ciclo de vida. Posteriormente, se calculó que la opción del contenedor es un 42,3% más cara, considerando el precio final por metro cuadrado (Atmaca & Atmaca, 2016).

En contraposición a los ACV de viviendas permanentes, los casos de ACV aplicado a VTE revisados evidencian que es común considerar periodos de vida útil mucho menores y más variables entre sí, según se observa en la **Tabla 21**. Esto se debe, en gran medida, a que, al estar vinculados a una emergencia por desastre natural, las características particulares de cada evento y contexto local condicionen dramáticamente el ciclo de vida de las VTE estudiadas. Por otra parte, se resalta que, en general, los ACV de VTE citados en párrafos anteriores coinciden con los ACV de viviendas permanentes en que la etapa de uso es la más significativa en cuanto a impactos ambientales.

El presente trabajo aporta al campo de la aplicación del ACV dentro del contexto peruano, pues, si bien actualmente se cuenta con casos de estudio aplicados a diversas edificaciones e infraestructura, este no es el caso de las VTE, que aún no han sido investigadas en profundidad. Asimismo, los resultados serán valiosos a nivel internacional gracias a que, dadas las condiciones climáticas locales, se analizan las VTE sin considerar sistemas HVAC para la etapa de operación, lo cual representa un caso único dentro de la bibliografía encontrada (ver **Tabla 21**).

2.3. Vivienda de emergencia como parte de la respuesta ante desastres naturales

La respuesta ante desastres naturales es parte de un proceso complejo que consta de varias fases. Algunas de ellas se dan con anterioridad al evento del desastre, tales como las fases de prevención y mitigación, mientras que las fases de respuesta, recuperación y reconstrucción son posteriores a este. En este proceso participa una serie de diferentes actores. En primer lugar, están la sociedad

afectada y el gobierno; seguidos de las agencias especializadas de las Naciones Unidas, tales como la OMS, PMA, UNICEF; los movimientos de la Cruz Roja y la Media Luna Roja; las ONG; las organizaciones gubernamentales internacionales, como la Unión Europea; las fuerzas armadas; el sector privado; y los grupos humanitarios improvisados (OCHA, 2018). La **Figura 1** muestra la secuencia previamente descrita y algunas de las instituciones involucradas, junto a su campo principal de acción.

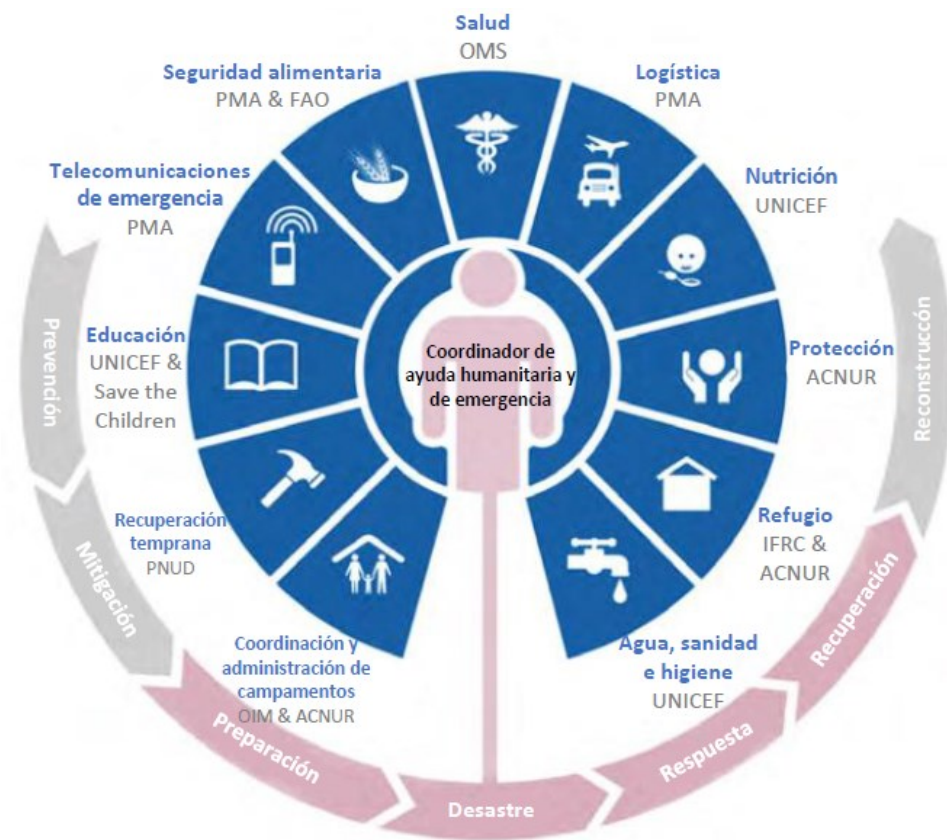


Figura 1: Etapas de la respuesta ante desastres

Fuente: Adaptado de OCHA, 2018

Para los países afectados, uno de los retos más desafiantes y controversiales durante la etapa de reconstrucción posterior al desastre es la provisión de alojamiento seguro, saludable y digno durante la duración de la misma, para los damnificados cuyos hogares han sido dañados más allá

de la habitabilidad (Atmaca & Atmaca, 2016; Shelter Centre, 2012). Una de las respuestas usuales por parte de gobiernos y de la comunidad internacional de ayuda humanitaria es la repartición de carpas. Esta es una solución parcial rápida pero temporal, pues el proceso de reconstrucción puede tomar varios años dependiendo de la magnitud del desastre y de las condiciones de cada lugar afectado. Además, la falta de refugio adecuado impacta negativamente en la salud y calidad de vida de los afectados durante la reconstrucción, lo cual a su vez puede hacer que esta última se prolongue (Shelter Centre, 2012). Este punto es de especial importancia debido a que la morbilidad psicológica de una gran población afectada por el estrés de un prolongado periodo de recuperación post desastre es significativamente superior incluso a la morbilidad de aquellos afectados por lesiones físicas (Parodi, Kahhat, & Vázquez-Rowe, 2021). Asimismo, si bien una fracción de los damnificados podrían ser instalada dentro de infraestructura acondicionada o alojarse transitoriamente en viviendas de parientes, de familias anfitrionas o alquiladas, lo usual es que se tenga que recurrir a construir viviendas temporales que les permitan mantener condiciones favorables hasta que sus hogares definitivos sean reconstruidos y puedan retornar a ellos (Shelter Centre, 2012). La **Figura 2** muestra el rol de la vivienda temporal como nexo entre la respuesta inicial a la emergencia y la reconstrucción permanente.

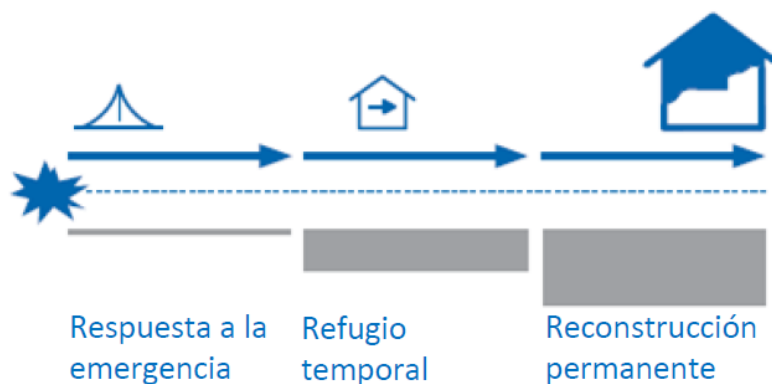


Figura 2: Rol de la vivienda temporal en el contexto de reconstrucción

Fuente: Adaptado de Shelter Centre, 2012

2.3.1. Casos internacionales

Un caso histórico del uso de las viviendas temporales ocurrió luego del terremoto $M_w = 7,9$ de San Francisco de 1906, el cual fue seguido por un incendio que duró tres días y destruyó más del 80% de la ciudad, matando a 3 000 personas y dejando a otras 225 000 sin hogar (USGS, 2017, 2018). Como parte de la respuesta inmediata, el ejército estadounidense creó asentamientos provisionales de emergencia, ilustrados en la **Figura 3**. Tres meses y medio después del terremoto, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos desarrolló modelos de cabañas de madera prefabricados y transportables, con áreas desde 13 hasta 37 m². Estas fueron rentadas a los damnificados, con la opción de recibir los derechos de posesión de la misma al cabo de un año de alquiler, bajo la condición de trasladar la vivienda a un sitio propio. A los 22 meses del desastre, ya todas las cabañas usadas habían sido trasladadas a su ubicación permanente (Calderón, 2013).



Figura 3: Transporte de cabaña de madera usada luego del terremoto de San Francisco de 1906

Fuente: Tomado de Calderón, 2013

Otro caso de aplicación de vivienda prefabricada fue la Casa desmontable 6x6 diseñada por Jean Prouvé (1944). Esta consistía en una estructura de vigas metálicas con un pórtico central y paneles

de madera para muros y piso. La vivienda contenía un único ambiente y podía ser armada por tres personas en un día y ser transportada en camión, según muestra la **Figura 4**. Asimismo, esta vivienda fue pensada para las familias de refugiados franceses trasladados por la Segunda Guerra Mundial. Precisamente por esta última, no fue posible fabricar muchos ejemplares del modelo, debido a la escasez de sus materiales principales (Chamblas, 2015).



Figura 4: Exterior e interior de Casa Desmontable 6x6

Fuente: Tomado de Galerie Patrick Seguin, 2019

Como respuesta a la necesidad de vivienda temporal por la Segunda Guerra Mundial, se idearon también otras propuestas como la Unidad Habitacional Desplegable Dymaxion, cuyo diseño se inspiró en la forma y material de los silos para granos, o el Refugio Primitivo Desmontable de Alvar Aalto, que buscaba generar grupos de cuatro viviendas que compartan un mismo sistema de calefacción central (Calderón, 2013; Casa abierta, 2018).

Otra alternativa más reciente es la desarrollada por la empresa inglesa Concrete Canvas. El Concrete Canvas Shelter (CCS) es un domo compuesto por tela impregnada de concreto, con un interior inflable de polietileno reforzado (ver **Figura 5**). Este modelo puede ser desplegado por dos personas en menos de una hora y estar listo para su uso luego de ser hidratado por 24 horas. Además, no es inflamable, ofrece buenas propiedades termales y tiene una vida útil de 10 años.

Una desventaja es que sus presentaciones de 25 y 50 m² requieren de maquinaria semipesada para su traslado, ya que se distribuyen en paquetes de 1,9 y 3,5 toneladas, respectivamente (Concrete Canvas, 2012).



Figura 5: Hidratación y elevaciones del CSS

Fuente: Tomado de Concrete Canvas, 2020

Chamblas (2015) recopiló información sobre 49 modelos de viviendas de emergencia, evidenciando que la madera, en sus distintas presentaciones, es uno de los materiales más usados en este sector, siendo el componente principal de 23 de los modelos estudiados. Entre otros materiales se encuentran el acero y distintos tipos plásticos, como polipropileno y poliuretano. Asimismo, se resalta la aplicación de los conceptos de modularidad, habitabilidad, posibilidad de ampliación o reutilización y facilidad de transporte y armado como criterios generales beneficiosos para este tipo de viviendas (Chamblas, 2015). Por su parte, Calderón (2013) resalta I) la importancia de la industrialización de la construcción y la prefabricación como factores que contribuyen a una respuesta rápida y de elevado control de calidad, ideal para situaciones de premura como lo son las emergencias por desastres y II) la dificultad de entender el concepto de temporalidad de, valga la redundancia, la vivienda temporal, por parte de los antiguos diseñadores, que intentaron imitar la morfología de una vivienda permanente, y por parte de sus usuarios,

quienes pueden asumir que esta es permanente, particularmente cuando no hubo comunicación adecuada entre las autoridades y la población afectada (Calderón, 2013).

Otras investigaciones, en cambio, advierten posibles desventajas de la prefabricación, por ejemplo, cuando esta se combina con la importación y resulta en diseños con baja aceptación por parte de la población damnificada, pues no corresponden al contexto local del lugar afectado por el desastre, además de que pueden resultar más caros y, en ocasiones, representan una alternativa más lenta al incluir el tiempo de transporte (Shelter Centre, 2012). A esto se añade el hecho de requerir grandes gastos públicos, que podrían destinarse a la reconstrucción permanente, y la posibilidad de generar impactos negativos sobre el medioambiente (Hosseini et al., 2021).

Asimismo, se proponen enfoques alternativos, como el de vivienda progresiva (ver **Figura 6**), que consiste en un proceso incremental orientado a crear un refugio caracterizado por la posibilidad de I) ser mejorado e incorporado como parte de una vivienda permanente; II) ser reutilizado con otra finalidad; III) ser trasladado en caso de ser necesario, por ejemplo, si por la emergencia se tuvo que ocupar un terreno no autorizado; IV) ser revendido, para obtener fondos que ayuden con la recuperación del hogar; y V) tener componentes que puedan ser reciclados (Shelter Centre, 2012).



Figura 6: Enfoque de vivienda progresiva

Nota: Obsérvese la transición gradual representada con una pendiente, en contraste con las etapas escalonadas de la Figura 2

Fuente: Adaptado de Shelter Centre, 2012

2.3.2. Casos nacionales

La historia más reciente en cuanto a desastres naturales en Perú ha estado marcada por sucesos como el terremoto $M_w = 8,0$ de Pisco del 15 de agosto de 2007, que dejó 596 fallecidos, 1 292 heridos, 48 208 viviendas destruidas y otras 45 500 inhabitables, con pérdidas económicas totales de 2 mil millones de dólares estadounidenses (INDECI, 2008; SwissRe, 2008; USGS, 2007). Villar-Vega y Silva (2017) indican que, en la región de Ica, aproximadamente el 80% de las casas de adobe que se habían construido sin diseño ingenieril colapsaron, mientras que las estructuras de albañilería informales mostraron daño medio a ligero. Por otro lado, las estructuras de tierra que sí fueron diseñadas con criterios sismorresistentes se desempeñaron satisfactoriamente, al igual que los sistemas de concreto armado y albañilería confinada, que mayoritariamente presentaron daños menores o ninguno, con limitados casos de colapso reportados, que fueron ocasionados por deficiencias estructurales como piso blando o geometría irregular (Villar-Vega & Silva, 2017).

El proceso de reconstrucción ha sido bastante lento. Por ejemplo, en Cañete, seis años después del terremoto, aún había familias viviendo en carpas y esteras. En 2013, de las 7 970 viviendas destruidas, se había reconstruido el 80% y de este grupo solo el 40% de casos han sido apoyados por los diferentes programas de vivienda, mientras que el 60% restante ha sido financiado por préstamos personales de los propios damnificados (El Comercio, 2013). Incluso diez años después, aún hay restauraciones y reparaciones pendientes, como las de la plaza de armas de Pisco y la Facultad de Pesquería de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Estas demoras han sido atribuidas a la corrupción presente en las obras de reconstrucción y en la entrega de bonos destinados a los damnificados (RPP, 2017).

No obstante, se han planteado iniciativas para mejorar esta situación. Un hito importante fue la creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) mediante la ley N°29664 promulgada en 2011, que constituyó un cambio significativo en el marco normativo nacional trascendiendo del enfoque de atención y respuesta a emergencias al enfoque de Gestión de Riesgo de Desastres (Misión de Naciones Unidas, 2014).

El SINAGERD está compuesto por varias entidades y grupos, algunos de ellos son el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), que se encarga, entre otras tareas, de la gestión reactiva ante desastres; el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) que proporciona y valida información oficial sobre peligros, emergencias y desastres para la oportuna toma de decisiones, funcionando todo el año sin interrupción; y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) que se encarga de la gestión prospectiva y correctiva del riesgo de desastres (CENEPRED, 2016; INDECI, 2020a, 2020b). Las entidades mencionadas cumplen con una serie de funciones adicionales a las mencionadas, en líneas anteriores se han listado solo algunas de las principales. Asimismo, el SINAGERD está compuesto también por las Fuerzas Armadas, la Policía Nacional del Perú, las entidades privadas y la sociedad civil (Congreso de la República, 2011), entre otros, según se esquematiza en la **Figura 7**.

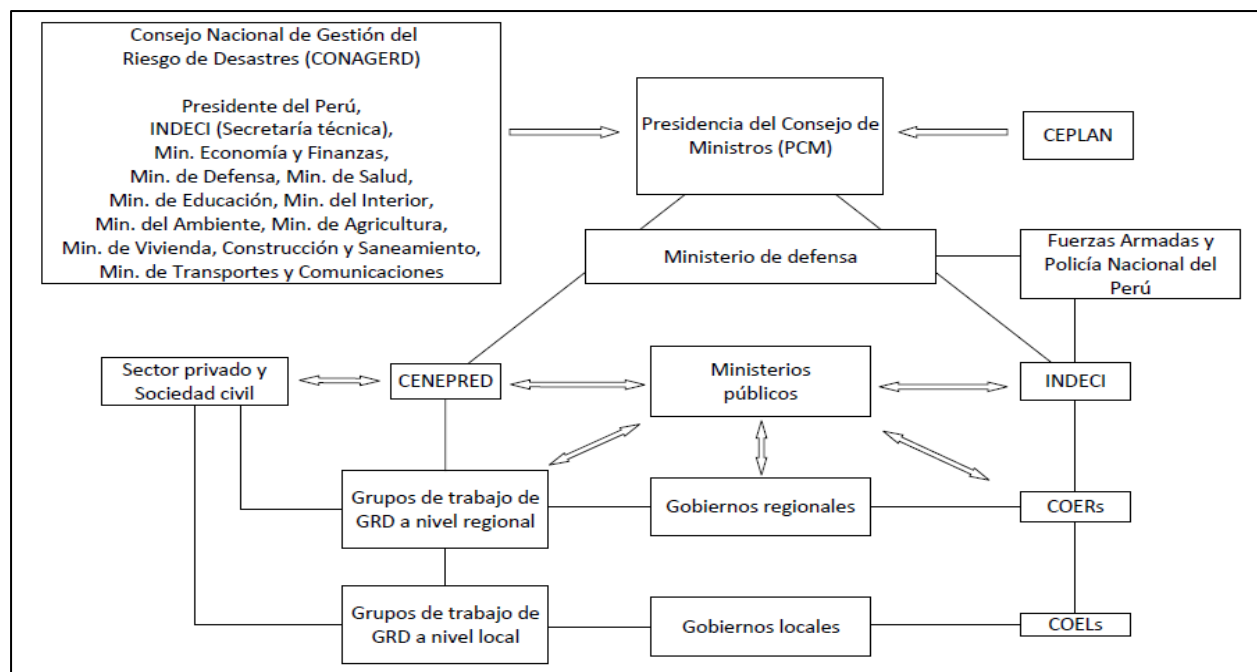


Figura 7: Actores institucionales y estructura del SINAGERD

Fuente: Adaptado de French et al., 2020

Pese a la intención de mejora, el diagrama anterior evidencia un elevado número de actores y alta complejidad en cuanto a organización. Aun cuando las responsabilidades de cada institución están formalmente definidas, traslapes sustanciales en los respectivos enfoques y retos por superar en cuanto a coordinación entre estos grupos han generado críticas a este sistema por no haber conseguido aún una integración funcional (French et al., 2020).

En 2017, en respuesta a la emergencia causada por el Niño Costero en la costa norte del Perú, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, integrante del SINAGERD, dispuso la distribución de diferentes opciones de módulos temporales de vivienda entre los damnificados. Las viviendas tenían en promedio un área de 18 m² y combinaban diferentes materiales para cada elemento como poyos de madera o concreto para la cimentación; bases modulares de vigas de madera o metálicas; pisos compuestos por tableros de *triplay* o vinílicos enrollables; muros hechos de paneles compuestos de EPS con cobertura de acero zinc-aluminizado o bastidores de madera

cubiertos con fibrocemento o listones machihembrados; y coberturas de techo con planchas de acero o de fibrocemento (MVCS, 2017).

Otro modelo similar desarrollado en Perú es la Vivienda Temporal Sencico, de 26,8 m²; con columnas, rieles y tijerales metálicos; muros hechos de paneles sándwich de fibrocemento, EPS, listones de madera y perfiles metálicos; y cobertura para el techo de planchas plásticas corrugadas (Arboccó Valderrama, s.a.). Por otra parte, también se han planteado alternativas menos convencionales como viviendas con columnas y vigas de palos de eucalipto, viguetas y correas de caña guayaquil y revestimientos de muros y techos de plástico reforzado (USAID, 2016). La **Figura 8** muestra estos modelos de vivienda temporal.



Figura 8: Viviendas temporales Sencico (izq.) y USAID (der.)

Fuente: Tomado de Arboccó Valderrama, n.d.; USAID, 2016)

3. Metodología del ACV

En esta sección se describe con mayor detalle en qué consiste un ACV; sus fases, componentes y aplicaciones; y las consideraciones específicas del ACV aplicado a edificaciones.

3.1. Definición de ACV

El ACV es una herramienta de gestión medioambiental que consiste en la compilación y evaluación de las entradas, salidas y potenciales impactos ambientales de un sistema de producto, entendido como una colección de procesos unitarios que realizan una o varias funciones definidas, a lo largo de todo su ciclo de vida, es decir, desde la extracción de materias primas o generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final (ISO, 2006a). Este enfoque sistemático de ciclo de vida permite identificar y evitar el traslado de problemas ambientales entre etapas del ciclo de vida o procesos individuales (EC-JRC-IES, 2010). Este último punto es muy importante pues, como demostró el ejemplo inicial del Freón, los problemas ambientales pueden ser involuntaria e inadvertidamente trasladados, trascendiendo barreras temporales y geográficas, afectando a generaciones futuras a nivel global.

Una de las propiedades esenciales del ACV es su enfoque relativo, ya que está estructurado alrededor de una unidad funcional (UF), que es la cuantificación de la función del sistema de producto que se está analizando (Soust-Verdaguer, Llatas, & García-Martínez, 2016). Asimismo, entre las características más importantes del ACV están I) su complejidad inherente, que a su vez motiva a que la transparencia sea un principio guía durante su ejecución para asegurar la correcta interpretación de resultados; y II) su exhaustividad, que se traduce en la consideración de aspectos del medioambiente, salud humana y recursos naturales; sin embargo, típicamente se excluye a los

aspectos sociales y económicos del análisis. Pese a esto, el enfoque de ciclo de vida y su metodología pueden aplicarse a estos ámbitos (ISO, 2006a).

El nivel de detalle en cuanto a requerimientos de información y métodos de análisis de un ACV puede variar considerablemente, pues dependen de los objetivos y el alcance planteados para cada caso individual (U.S. EPA, 2006). Además, la gran cantidad de datos involucrados y la incertidumbre inherente a estos representan limitaciones importantes que siempre deben ser documentadas y comunicadas como parte del proceso de ACV (ISO, 2006a). Asimismo, es importante resaltar que un ACV no predice los impactos medioambientales de manera absoluta o precisa con respecto a una ubicación y periodo determinados, sino que señala impactos ambientales potenciales relativos a la UF seleccionada (EC-JRC-IES, 2010).

Entre las aplicaciones del ACV se tienen la elaboración de políticas, estrategia de ventas, educación y comunicación pública, ecoetiquetado de productos, mercadotecnia, identificación de oportunidades de mejora ambiental para planificación estratégica y optimización de productos y servicios, auditorías ambientales, minimización de residuos y el desarrollo de declaraciones ambientales de productos (Vázquez-Rowe, 2014).

3.2. Fases de un ACV

La ejecución de un ACV se da a lo largo de cuatro fases principales siguiendo un procedimiento iterativo. Esto se debe a que es una constante evaluar los resultados de cada fase intermedia del ACV con respecto a fases anteriores, por lo cual, en ocasiones, puede ser necesario modificarlas conforme se obtienen resultados parciales y se aprende más del sistema de estudio (ISO, 2006a).

La **Figura 9** esquematiza este proceso.

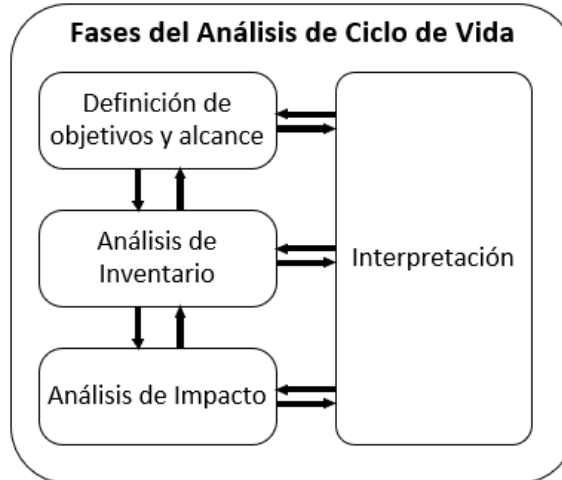


Figura 9: Fases principales de un ACV

Fuente: Adaptado de Petrovic et al., 2019

3.2.1. Definición de objetivos y alcance

Al realizar un ACV, se está construyendo un modelo del producto o sistema a analizar, es decir, se está realizando una simplificación de una realidad compleja, por lo que inevitablemente esta tendrá que ser distorsionada en cierta medida. Por ello, uno de los retos para quien ejecuta un ACV es desarrollar un modelo de tal forma que las simplificaciones no afecten demasiado a los resultados, para lo cual es necesario definir cuidadosamente los objetivos y el alcance del estudio (Goedkoop, Oele, Leijting, Ponsioen, & Meijer, 2016).

Dentro del objetivo del ACV se debe indicar la aplicación prevista del estudio, la justificación para ejecutarlo, el público objetivo y, finalmente, si es que se pretende usar los resultados del ACV para una aserción comparativa pública (EC-JRC-IES, 2010). Cabe también la posibilidad de que un ACV sirva más de un propósito a la vez, por ejemplo, que sus resultados tengan una aplicación interna y otra externa. En dicho caso, esto debe ser indicado claramente en esta sección (Milousi, 2018).

Por su parte, el alcance del ACV debe definir sin ambigüedad cuál es el sistema de producto que se va a analizar y la función que este desempeña. Posteriormente, esta función debe ser cuantificada para definir la unidad funcional, que, como se mencionó anteriormente, es el valor numérico de dicha función y es el objeto principal de estudio del ACV debido a que toda la información de las fases posteriores es relativa o está escalada a esta UF (EC-JRC-IES, 2010). Es importante mencionar que aplicar un ACV a más de un sistema es equivalente a aplicarlo independientemente a cada uno, teniendo en cuenta que para ello es indispensable que estos cumplan la misma función y se haya definido la misma UF (Balasbaneh et al., 2019).

Asimismo, dentro del alcance se deben describir los límites del sistema, requerimientos de calidad de la información, procedimientos de asignación, metodología para el análisis de impacto, suposiciones y limitaciones del estudio e indicar si se realiza algún tipo de revisión crítica (ISO, 2006b). En los párrafos siguientes se detallan estos elementos.

Los diferentes sistemas de productos tienden a estar interrelacionados de maneras complejas. Por ejemplo, al analizar un alimento genérico se debe considerar su distribución, siendo un caso común el transporte terrestre por camiones, los cuales contienen acero, para cuya producción se emplea carbón, que a su vez requiere el uso de otros camiones dentro de su obtención. Casos como el anterior evidencian que no es factible modelar rigurosamente la totalidad de entradas y salidas de un sistema, por lo que resulta necesario trazar límites para el análisis (Goedkoop et al., 2016). Estos límites del sistema (LS) representan a un conjunto de criterios que especifican qué procesos unitarios son incluidos en el ACV y el nivel de detalle con que estos son analizados. La elección de los LS es una de las decisiones que debe tomar quien ejecuta el estudio del ACV, considerando el objetivo planteado, las restricciones de información identificadas y las suposiciones iniciales que se hayan tomado (ISO, 2006a). Asimismo, como parte de esta elección se puede optar por

prescindir de algunas etapas del ciclo de vida o procesos unitarios, siempre que estas omisiones sean indicadas, justificadas y no cambien significativamente las conclusiones del estudio (EC-JRC-IES, 2010).

Para esquematizar los LS resulta útil el uso de un diagrama de flujo de procesos, que muestra el inicio y fin los procesos unitarios, además de sus interrelaciones. Estos procesos unitarios son el elemento de análisis más pequeño dentro del ACV y consisten en la transformación de entradas en salidas, pudiendo ser materiales, energía o productos o servicios (U.S. EPA, 2006). Para seleccionar las entradas a incluir dentro de los LS, se puede establecer criterios de corte basados en un umbral dependiente de su masa, energía o nivel de impacto ambiental, a partir del cual se consideraría como relevante para el estudio (ISO, 2006b).

Una consideración importante al definir los LS reside en la inclusión o exclusión de bienes capitales, es decir, aquellos que sirven para producir otros bienes o servicios. Se pueden distinguir tres órdenes para este análisis: I) el primer orden considera solo la producción de materiales y el transporte, II) el segundo orden abarca todas las etapas del ciclo de vida, pero excluye los bienes capitales y, III) el tercer orden incluye el ciclo de vida completo y un modelo de primer orden para los bienes capitales (Goedkoop et al., 2016).

Es importante resaltar que la propiedad fundamental de un sistema de producto es la función o funciones que este cumple, estas no pueden definirse únicamente en términos de productos finales (Mannheim, Fehér, & Siménfalvi, 2019). Como se mencionó previamente, un sistema de producto está compuesto por una serie de procesos unitarios, cada uno de estos transforma entradas en salidas, las cuales pueden ser catalogadas como flujos de materia, flujos de energía, emisiones, productos y coproductos. Un coproducto se define como cualquiera de los productos resultantes de

un mismo proceso unitario o sistema de producto (ISO, 2006a). Este proceso de división en procesos individuales facilita la identificación rigurosa de entradas y salidas del sistema (National Research Council, 2014). La **Figura 10** ilustra estos conceptos.

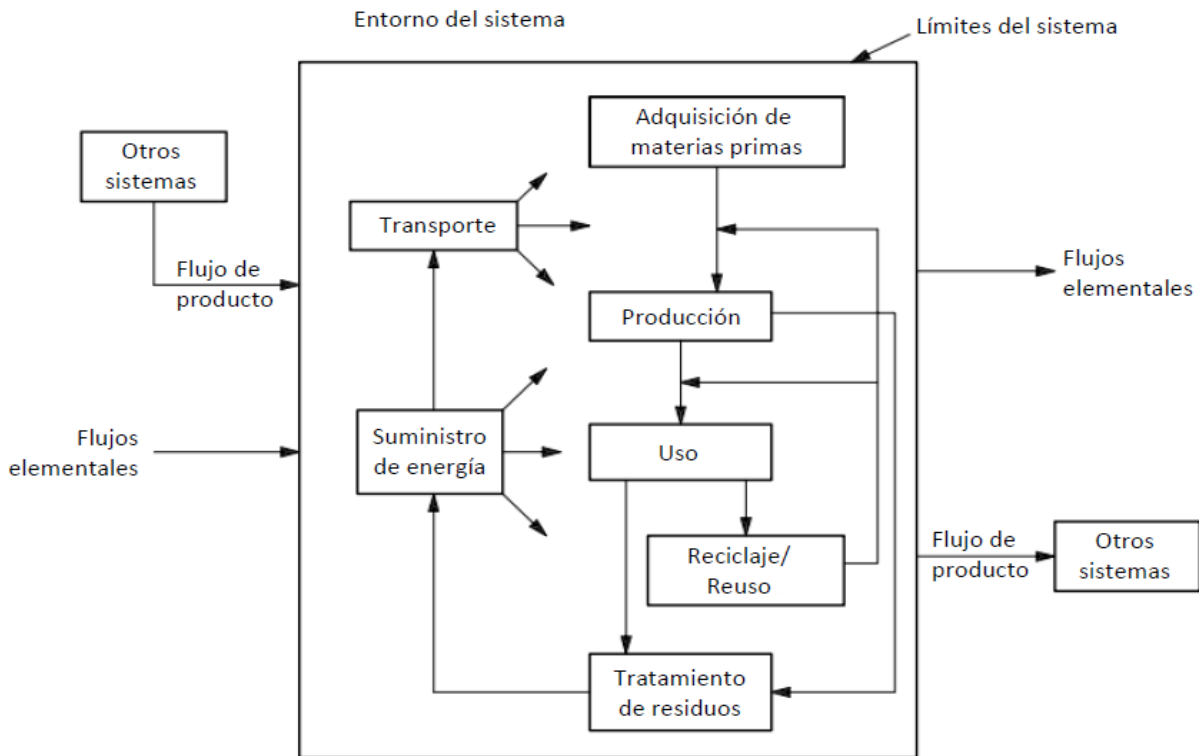


Figura 10: Sistema de producto, entorno y límites

Fuente: Adaptado de ISO, 2006a

El presente estudio emplea el modelado atribucional, el cual es recomendado para comparaciones entre productos con la misma UF (Goedkoop et al., 2016). Para lidiar con el caso especial que representan los procesos multifuncionales, se puede subdividir aquellos procesos que resulten en varios coproductos o que cumplan más de una función. Cuando esto no sea posible, resulta necesario realizar una asignación de impactos a los distintos coproductos resultantes mediante un procedimiento claramente definido, de manera que a cada uno se le adjudique una fracción de las salidas del proceso o sistema de producto. Para ello, deben usarse criterios basados en alguna

propiedad física de los coproductos, como la masa, volumen, energía o, en su defecto, alguna otra relación entre los mismos, como puede ser su valor económico (Cederberg & Stadig, 2003). Este último es el criterio socioeconómico de asignación más frecuentemente utilizado pese a que tiene la menor prioridad en la norma ISO y a que su uso puede introducir sesgos que dificulten la representación adecuada de la dimensión medioambiental de la actividad económica desde una perspectiva biofísica (Pelletier & Tyedmers, 2011).

Un ejemplo del problema anterior es la producción de leche de vaca, que tiene como coproductos inevitables la carne de las vacas sacrificadas y terneros adicionales. Dadas las características del caso, sería factible repartir los impactos ambientales, emisiones y demás salidas del proceso de producción proporcionalmente al valor económico de cada producto o coproducto, es decir, realizar una asignación de impactos económica (Cederberg & Stadig, 2003).

Dentro del alcance del ACV se deben especificar también los requerimientos de calidad de la información con la que se desarrollará el estudio, de tal manera que sea posible cumplir con el objetivo planteado. Estos requerimientos deben considerar la antigüedad, cobertura geográfica y tecnológica, completitud, precisión, representatividad, consistencia, reproducibilidad e incertidumbre de la información de entrada (Heijungs, Udo de Haes, White, & Golden, 2008b). Asimismo, debe indicarse cuál es el tratamiento para los datos faltantes (ISO, 2006b).

3.2.2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

El análisis de inventario comprende la recolección de información y su procesamiento para obtener la cuantificación de las entradas y salidas relevantes del sistema de producto bajo análisis, a lo largo de su ciclo de vida (Heijungs et al., 2008b). La **Figura 11** muestra la secuencia de pasos recomendada para la realización del inventario, los cuales se detallan a continuación.

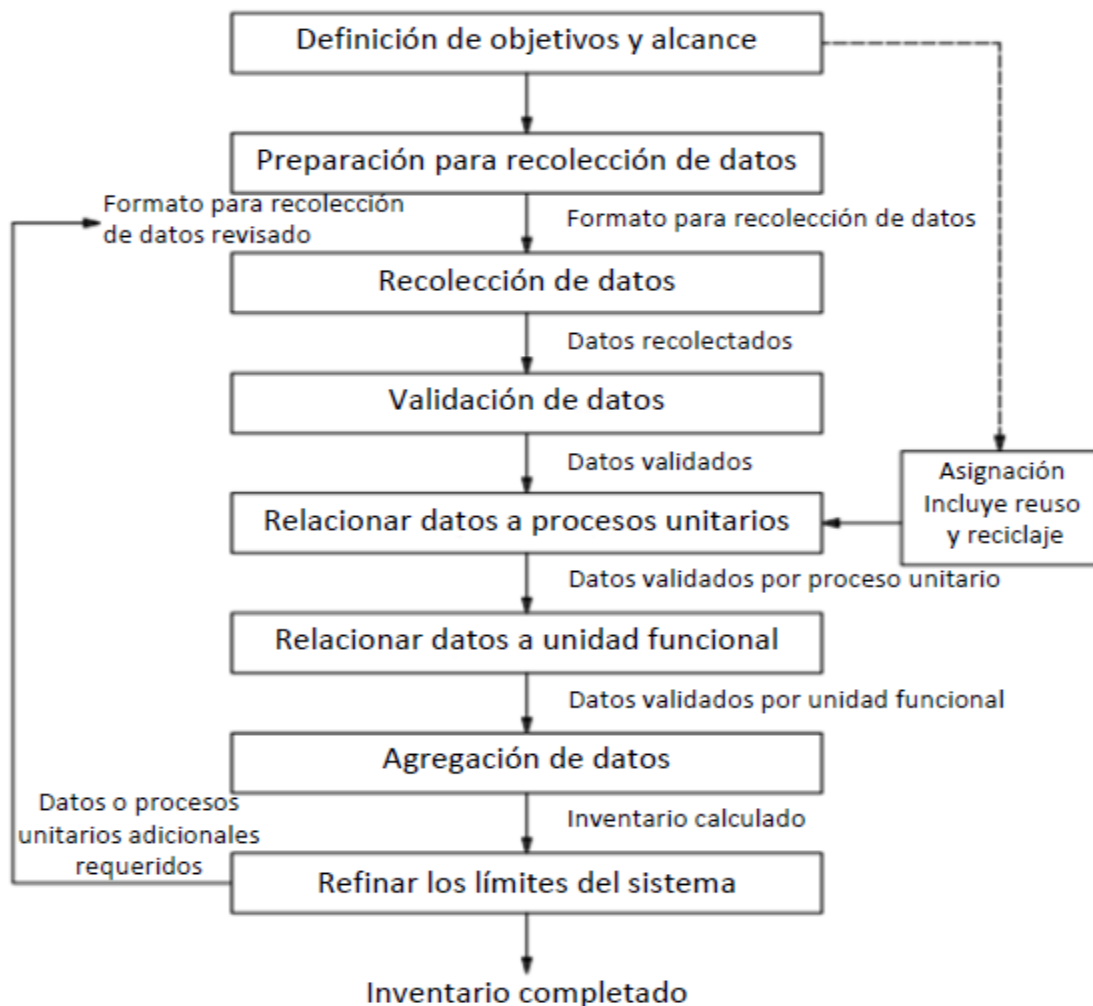


Figura 11: Procedimiento para el Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

Fuente: Adaptado de ISO, 2006b

La recolección de datos se realiza para cada proceso unitario comprendido dentro de los LS, identificando y cuantificando sus entradas y salidas, pudiendo estas clasificarse en energía, materiales, productos, coproductos, desechos, emisiones, etc. Estos datos pueden ser medidos, calculados o estimados, pero siempre deben ser referenciados cuando son obtenidos de una fuente pública (ISO, 2006b). Este paso es un proceso intensivo en recursos, a veces llegando a ser la tarea más demandante dentro del ACV, por lo que se deben evaluar la disponibilidad de la información

junto con el tiempo y los recursos a necesarios para obtenerla frente a los beneficios que se obtendrán del ACV (EC-JRC-IES, 2010; U.S. EPA, 2006).

Posteriormente, estos datos deben ser validados según los requerimientos de calidad previamente establecidos. Además, pueden realizarse balances de masa y energía para las entradas y salidas de los procesos unitarios. En caso de encontrarse datos anómalos, pueden buscarse fuentes alternativas (ISO, 2006b). Más adelante, esta información validada debe expresarse en términos de la UF, resultando en un flujo de procesos con los valores numéricos de las entradas y salidas escalados al valor de la UF (Haque, 2020).

Es importante distinguir entre la información primaria o de primer plano (*foreground data*), que es aquella que necesita ser adquirida para un caso específico de estudio, de la información secundaria o de fondo (*background data*), que corresponde a productos y procesos más genéricos y puede obtenerse de bases de datos o de la literatura especializada (Muralikrishna & Manickam, 2017). Además, se debe considerar que esta clasificación puede variar dependiendo del sistema a analizar, por ejemplo, al realizar un ACV sobre un electrodoméstico común distribuido en camiones, sus procesos de transporte pueden modelarse usando información obtenida de bases de datos, que cubriría los requerimientos de calidad de datos para procesos estándar. Por otro lado, si el ACV se aplicara a los propios camiones, lo más adecuado sería recolectar información específica de estos, por ejemplo, realizando mediciones directas de sus emisiones y eficiencia (Goedkoop et al., 2016).

Una de las bases de datos más completa, transparente e internacionalmente empleada para la recolección de información de fondo es Ecoinvent, con datos de aproximadamente 18 000 procesos de diversos sectores industriales, tales como energía, agricultura, transporte, construcción, tratamiento de residuos, entre otros (EcoInvent, 2013; Soust-Verdaguer et al., 2016). Ecoinvent es

resultado de un esfuerzo conjunto de diferentes organizaciones suizas, responsables de la compilación de información y su posterior distribución y administración, y provee para cada proceso información relativa a su incertidumbre, que por medio de herramientas estadísticas puede servir para estimar mejor la incertidumbre de los resultados (EcoInvent, 2021a, 2021b, 2021c).

Asimismo, es a partir de esta fase que, dada la magnitud de los datos y la complejidad de los análisis que requiere un ACV, resulta prácticamente indispensable apoyarse en herramientas informáticas como software especializado para este fin. Una de las soluciones más empleadas a nivel global es SimaPro, desarrollado por la empresa neerlandesa PRé Sustainability. SimaPro facilita el proceso de elaboración de ACV a lo largo de todas sus fases, con especial énfasis en las fases de análisis de inventario y la inmediatamente posterior, análisis de impactos. Este software incluye, además de Ecoinvent, varias otras bases de datos muy útiles en sectores y contextos específicos, tales como Agri-footprint, USLCI (US Life Cycle Inventory Database) y ELCD (European Life Cycle Database) (PRé, 2020a). Existen muchos otros softwares diseñados para la aplicación de ACV a todo tipo de productos, los cuales se listan en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Software especializado para ACV

Software para ACV	Sitio web
Boustead	www.boustead-consulting.co.uk
Eco-it	www.pre.nl
Ecopro	www.sinum.com
Ecoscan	www.ind.tno.nl
Euklid	www.ivv.fhg.de
KCL Eco	www.kcl.fi/eco
GaBi	gabi.sphera.com/international/index/
LCAit	www.ekologik.cit.chalmers.se
Team	www.ecobilan.com
Wisard	www.pwcglobal.com
Umberto	www.umberto.de
SimaPro	simapro.com/about/
OpenLCA	www.openlca.org/products
EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)	www.eiolca.net/

Fuente: Adaptado de Anand & Amor, 2017; Zabalza Bribián et al., 2009

Dentro de SimaPro, Ecoinvent cuenta con seis versiones diferentes según las combinaciones de dos criterios. El primero depende de si se aplican los principios del modelado consecuencial o el atribucional, con una subdivisión en este último con respecto a la consideración u omisión de los beneficios de materiales reciclados. Estas versiones de la base de datos son llamadas *Consequential*, *Allocation at point of substitution* (APOS, previamente *Allocation default*) y *Allocation cut-off by classification* (previamente *Allocation recycled content*), respectivamente (EcoInvent, 2015a, 2015b, 2021d).

Por otro lado, la información de entradas y salidas de cada proceso puede ser presentada usando referencias a otros procesos unitarios, generando un árbol de procesos complejo y de varios pasos, lo que se conoce como un *Unit Process*; o, alternativamente, se puede usar una versión simplificada del árbol de procesos en un solo paso, con el total de entradas y salidas asignadas al proceso en cuestión y sin vínculos a algún otro proceso, a lo que se llama *System Process*. El primero ofrece la ventaja de permitir rastrear la contribución de todos los subprocesos individuales y conservar información de cada uno de ellos, como su nivel de incertidumbre, mientras que el segundo facilita cálculos más rápidos y permite ver una versión más simple de los resultados, a costa de la información individual de cada subproceso, por lo que se lo podría considerar una caja negra (Goedkoop et al., 2016). Las seis versiones de Ecoinvent 3.6 incluidas en SimaPro se muestran en la **Tabla 2**, según las combinaciones de los dos criterios mencionados.

Tabla 2: Versiones de Ecoinvent 3.6 incluidas en SimaPro

Tipo de modelado	Tipo de procesos	
	Unit	System
Consequential	Consequential, unit processes	Consequential, system processes
Allocation APOS	Allocation APOS, unit processes	Allocation APOS, system processes
Allocation cut-off by classification	Allocation cut-off by classification, unit processes	Allocation cut-off by classification, system processes

Fuente: Adaptado de PRé, 2020b

Como se ilustró en la **Figura 9**, el análisis de inventario es una fase iterativa pues a medida que se recolecta información sobre el sistema de estudio, pueden identificarse nuevos requerimientos o limitaciones con respecto a los datos. En consecuencia, puede optarse por cambiar alguno de los procedimientos de recolección de datos o por modificar los objetivos y el alcance del ACV, lo cual constituiría, respectivamente, una iteración dentro de la misma fase de inventario o entre fases distintas del ACV (ISO, 2006a).

En síntesis, el resultado final de esta fase, es decir, el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), es entonces una recopilación de múltiples procesos unitarios con entradas y salidas cuantificadas relativamente a la UF previamente escogida.

3.2.3. Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

El propósito de esta fase es asociar los resultados del ICV con una serie de potenciales impactos ambientales, también referidos a la misma UF (EC-JRC-IES, 2010). Para ello, se deben seguir las subfases obligatorias de I) selección de categorías e indicadores de impacto y modelos de caracterización; II) clasificación; y III) caracterización; esta organización del trabajo aumenta la transparencia del ACV y facilita un posterior análisis de calidad del procedimiento (ISO, 2006a).

La **Figura 12** esquematiza este procedimiento.

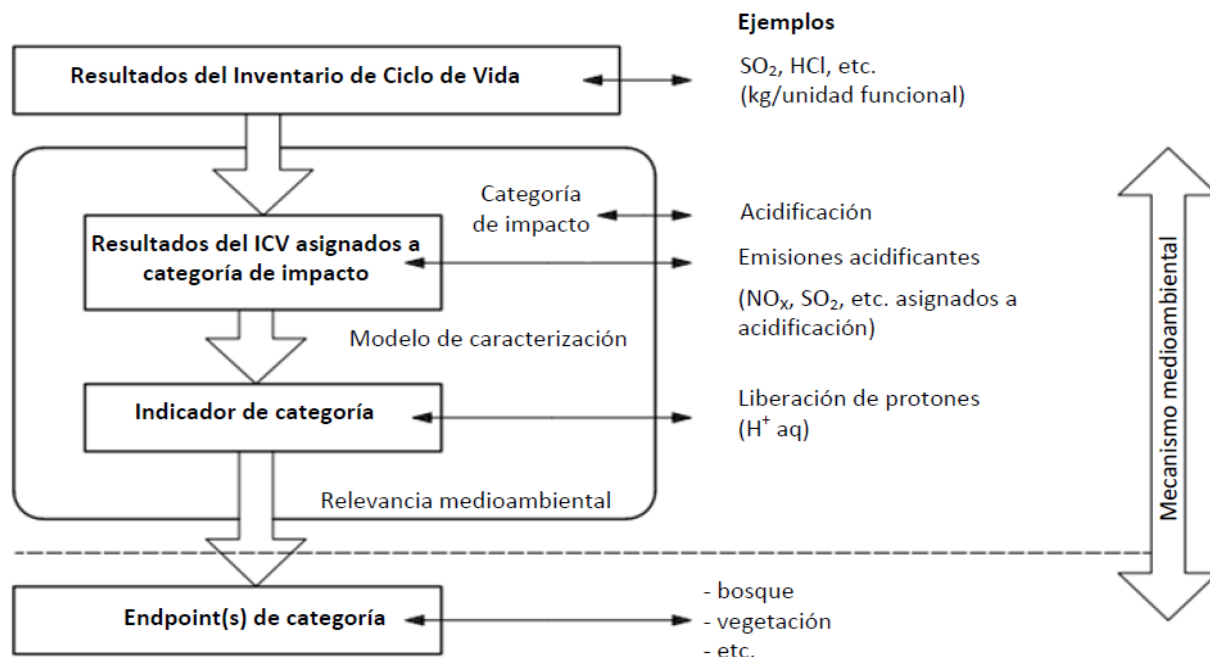


Figura 12: Subfases del Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

Fuente: Adaptado de Heijungs, Udo de Haes, White, & Golden, 2008a

3.2.3.1. Selección de categorías e indicadores de impacto y modelos de caracterización

Una categoría de impacto ambiental es una representación de alguna cuestión de interés ambiental, cuantificable por medio de un indicador de impacto; algunos ejemplos son el cambio climático y la eutrofización de agua dulce, entre otros, cuyos respectivos indicadores de impacto son el forzamiento radiativo infrarrojo y la concentración de fósforo (Heijungs, Huijbregts, & Goedkoop, 2013). Las categorías de impacto ambiental deben reflejar los problemas ambientales relacionados al sistema estudiado, considerando también el objetivo y alcance del ACV (U.S. EPA, 2006; Wind Energy, 2009). Los resultados del inventario se relacionan con cada categoría de impacto por medio una serie de procesos físicos, químicos y biológicos previamente estudiados, cuyo conjunto se conoce como mecanismo medioambiental. Varios mecanismos medioambientales son a su vez agrupados dentro de un modelo de caracterización (ISO, 2006a). La primera subfase del Análisis de Impacto consiste entonces en seleccionar convenientemente categorías e indicadores de impacto

y modelos de caracterización que reflejen problemas medioambientales de relevancia directa con el sistema bajo análisis y que sean, además, científicamente válidos e internacionalmente aceptados (EC-JRC-IES, 2010).

Dentro de cada mecanismo medioambiental, se define como un *endpoint* a una de las consecuencias finales de este, mientras que un *midpoint* es un indicador de impacto ubicado en un punto intermedio del mecanismo (Goedkoop et al., 2016). Las categorías de impacto ambiental se dividen según si su indicador es un *endpoint* o *midpoint*. Las categorías *endpoint* corresponden a áreas de protección que conforman la base para la toma de decisiones en política y el desarrollo sostenible, además de que suelen ser pocas y por ello simplifican la interpretación y comunicación de los resultados, a expensas de una incertidumbre relativamente alta (Heijungs, Huijbregts, et al., 2013; PRé, 2019). Por otra parte, las categorías *midpoint* son más numerosas y diversas, por lo que sus resultados están asociados a una menor incertidumbre y una interpretación más compleja, según ejemplifica la **Figura 13** para el caso de la categoría de cambio climático (PRé, 2019). La **Figura 14** muestra dos ejemplos de mecanismos medioambientales con los procesos incluidos en estos y los *midpoints* y *endpoints* en los que se basan algunas metodologías.

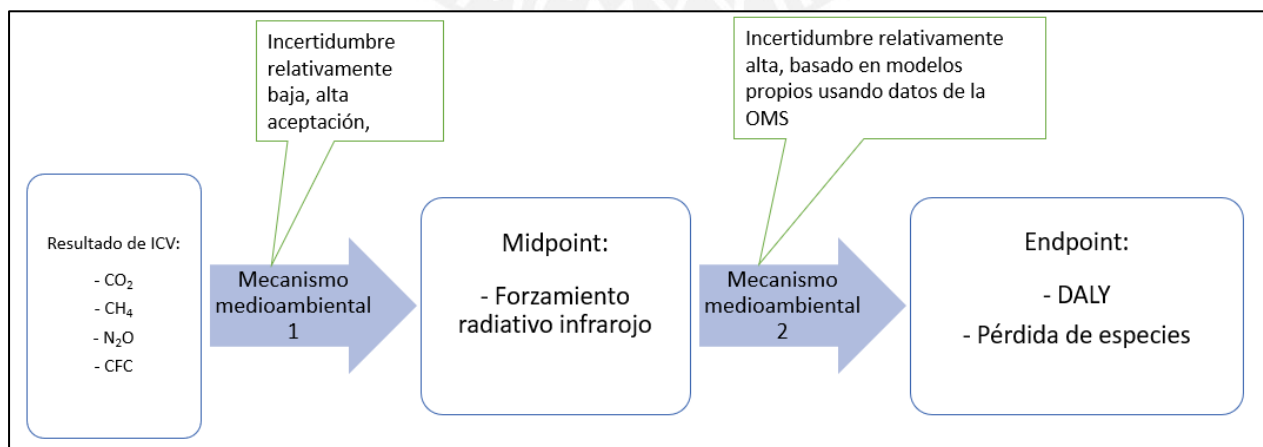


Figura 13: Indicadores midpoint y endpoint para la categoría de cambio climático

Fuente: Adaptado de Heijungs, Goedkoop, Huijbregts, De Schryver, & Strujis, 2013

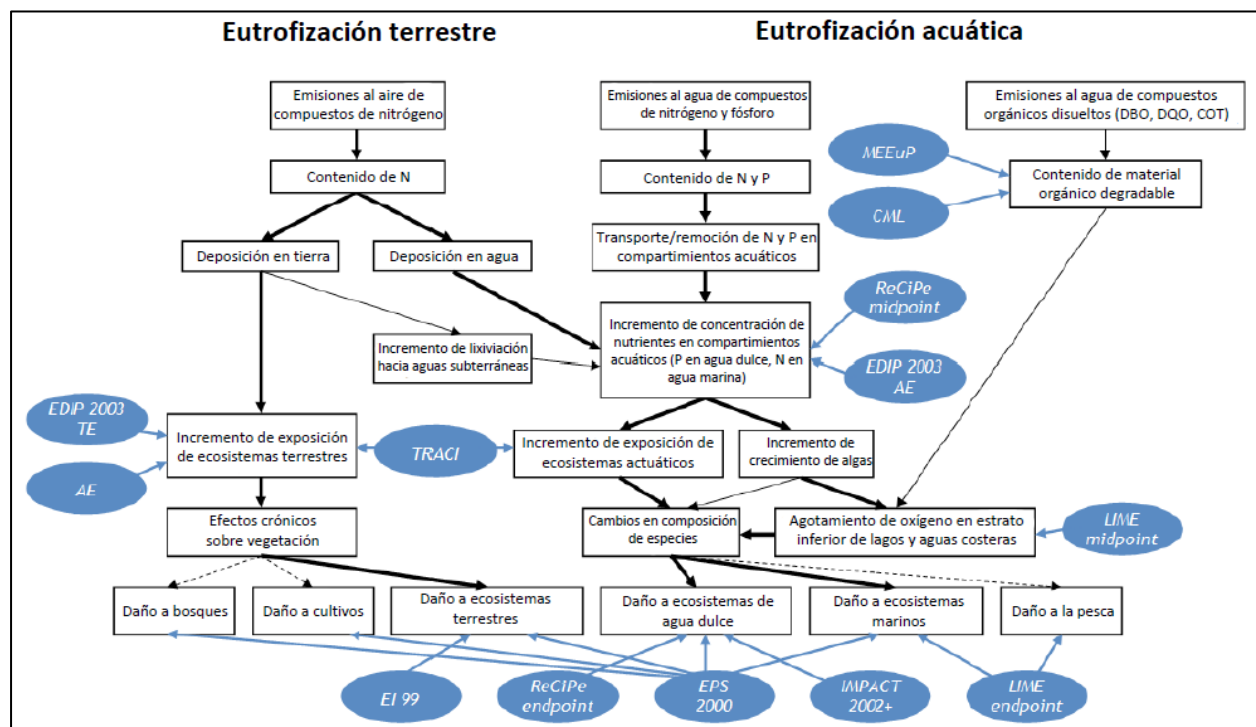


Figura 14: Mecanismo medioambiental de la eutrofización terrestre y acuática

Fuente: Adaptado de Goedkoop et al., 2016

3.2.3.2. Clasificación

La clasificación, por su parte, consiste en la asignación de los resultados del inventario a las categorías de impacto seleccionadas. Estos resultados pueden afectar a más de una categoría de impacto y causar sus efectos mediante mecanismos medioambientales paralelos o en serie (ISO, 2006b). Por ejemplo, si se encontrara dentro de las emisiones de un producto al dióxido de azufre, este sería clasificado dentro de las sustancias que aportan a las categorías de impacto de acidificación terrestre y a la formación de material particulado.

3.2.3.3. Caracterización

La última subfase obligatoria es la caracterización, que implica el cálculo numérico de los indicadores de impacto asociados a cada categoría seleccionada, mediante el empleo de factores de

caracterización, que están determinados dentro de los modelos de caracterización y son usados para convertir los resultados del inventario a la unidad común de cada indicador de categoría ambiental (Heijungs, Udo de Haes, White, & Golden, 2008c). Como ejemplo, para el caso del cambio climático y la eutrofización de agua dulce, los factores de caracterización respectivos son el potencial de calentamiento global, expresado en unidades de kg de dióxido de carbono equivalente emitido a la atmósfera (kg CO₂-eq) y el potencial de eutrofización de agua dulce, medido en unidades de kg de fósforo equivalente emitidas en agua dulce (kg P-eq) (Heijungs, Huijbregts, et al., 2013). El resultado de esta fase, llamado perfil de impacto de ciclo de vida, es una compilación discreta de los indicadores de impacto cuantificados y expresados en unidades comunes para cada categoría (EC-JRC-IES, 2010).

Las categorías de impacto y modelos de caracterización deben ser seleccionados por quien ejecuta el ACV. Inevitablemente, esta decisión introduce subjetividad al estudio, por lo que se requiere documentarla y explicarla consecuentemente con los objetivos y el alcance del estudio (ISO, 2006a).

3.2.3.4. Elementos opcionales

Dependiendo de los objetivos y alcance del ACV, pueden optarse por aplicar la normalización, ponderación o ambas, sobre los resultados de la caracterización. La normalización consiste en el cálculo de las magnitudes de los diferentes indicadores de impacto en relación a un valor referencial dado. Esto se realiza dividiendo los resultados de los indicadores entre algún valor fijo de referencia como el valor total de ese indicador en un país específico o su valor promedio per cápita, por ejemplo. La normalización es útil para comunicar la escala de los resultados del perfil de impacto simplificando su interpretación y permite identificar posibles inconsistencias en este (Heijungs et al., 2008c).

Por su parte, la ponderación permite homogeneizar los resultados de diferentes indicadores de impacto, multiplicado cada uno de estos por un factor de ponderación, que es un valor subjetivo que representa la importancia que se le da a cada categoría de impacto. Al conseguir que todos los indicadores de impacto estén expresados en las mismas unidades, es posible sumarlos y expresar el perfil de impacto como un único valor. Es importante recalcar que estos factores de ponderación no poseen una base científica y son elección de quien ejecuta el ACV. Por ello, los resultados previos a la ponderación, sean normalizados o no, siempre deben ser presentados junto con los resultados ponderados (EC-JRC-IES, 2010). La subfase de ponderación es frecuentemente usada para aquellos ACV usados para la toma de decisiones internas (Goedkoop et al., 2016).

Actualmente, existen publicadas una gran variedad de metodologías estandarizadas para la ejecución del Análisis de Impacto de Ciclo de Vida. Cada una de estas cuenta con un grupo determinado de categorías de impacto ambiental, modelos y factores de caracterización, valores de referencia para la subfase de normalización y factores de ponderación. No existe consenso sobre una única metodología como la mejor de todas, por lo que se debe seleccionar la metodología más conveniente para cada caso específico, según los objetivos y el alcance del ACV (Goedkoop et al., 2016).

El presente trabajo se ha desarrollado empleando la metodología de impacto ReCiPe 2016 v1.04, la cual incluye un total de 21 categorías de impacto, 18 *midpoint* y 3 *endpoint*, además de factores de caracterización representativos a escala global (PRé, 2019). Pese a que todos los modelos de caracterización reflejan nuestro conocimiento incompleto e imperfecto de las relaciones que se estudian, ReCiPe mitiga este problema agrupando distintas fuentes de incertidumbre y elecciones en tres perspectivas: individualista (I), jerárquica (H) e igualitaria (E). Cada una de estas representa elecciones específicas en cuanto al plazo temporal de análisis, adaptación de los humanos a los

problemas ambientales futuros, etc., que se traducen en diferentes factores de ponderación y, en algunos casos, factores de caracterización (Heijungs, Huijbregts, et al., 2013). El total de las categorías de impacto abarcadas por ReCiPe 2016 se listan en la **Figura 15**.

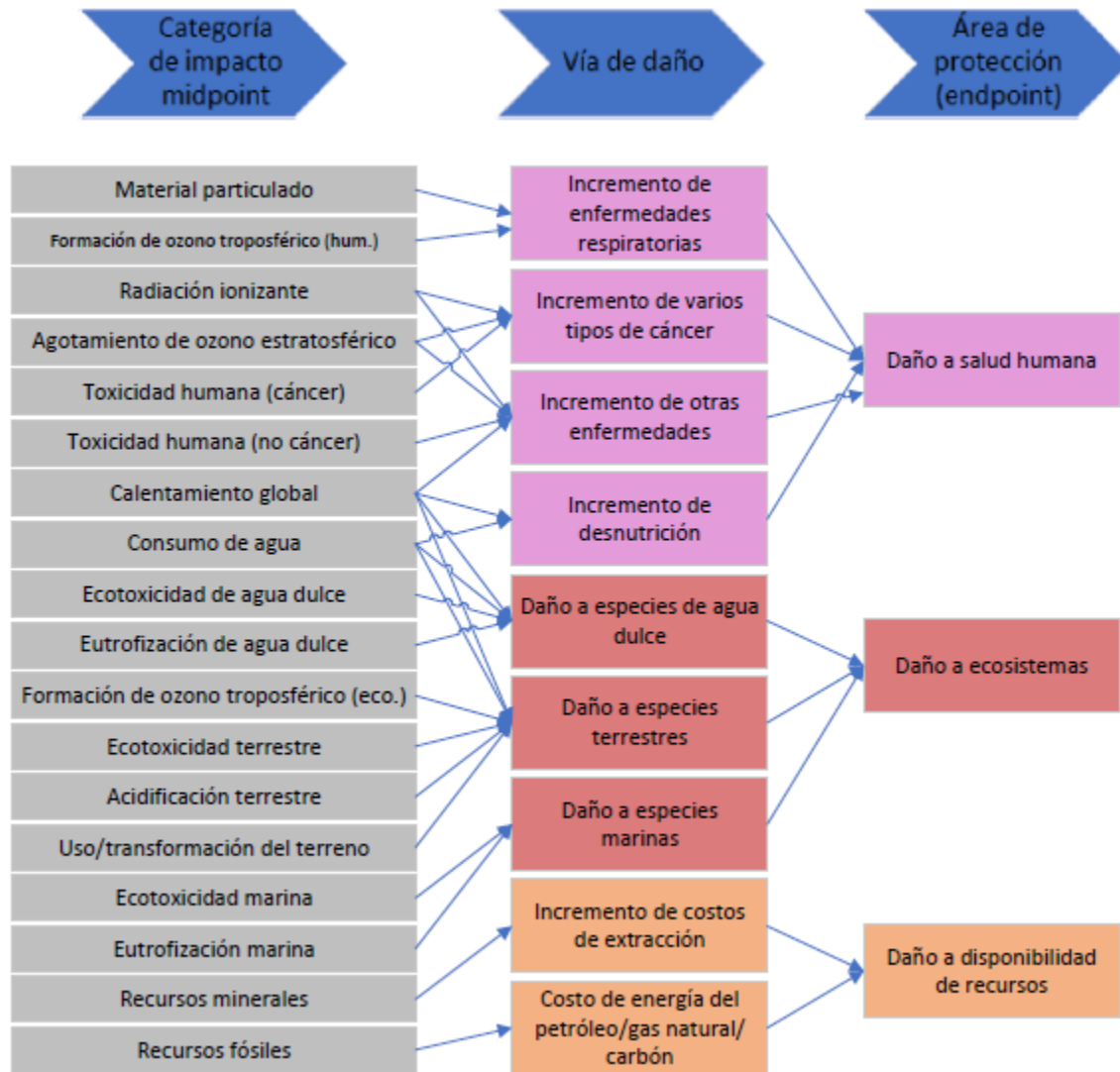


Figura 15: Categorías de impacto del método ReCiPe 2016

Nota: Se muestran todas las categorías descritas por ReCiPe 2016; no obstante, el caso de estudio se enfoca en un subconjunto de estas según se detalla en la sección 4.3.3

Fuente: Adaptado de PRé, 2019

3.2.4. Interpretación de Ciclo de Vida

Esta fase evalúa los resultados de las fases anteriores de Inventario y Análisis de Impacto de Ciclo de Vida con respecto a los objetivos y alcance establecidos para establecer conclusiones y recomendaciones (Heijungs, Udo de Haes, White, & Golden, 2008d). Para realizar la Interpretación de Ciclo de Vida, debe iniciarse con una identificación de problemas en los resultados de las fases previas, tales como falta de datos con respecto al inventario o a las categorías de impacto, para asegurar que se esté cumpliendo con los objetivos y el alcance propuestos al inicio del ACV (EC-JRC-IES, 2010).

Posteriormente, con el fin de establecer confianza en los resultados del estudio, se debe realizar una evaluación integral de las fases anteriores. Para ello, pueden aplicarse una revisión de completitud, en la que se verifica que los todos datos necesarios para la interpretación estén disponibles y completos, caso contrario, se pueden revisar las fases de inventario o de análisis de impacto, así como optar por modificar los objetivos y alcance, si es necesario y está justificado (ISO, 2006b).

Asimismo, como parte esta fase de evaluación se recomienda realizar un análisis de sensibilidad, cuyo fin es evaluar la influencia de las suposiciones, la incertidumbre de los datos y las elecciones metodológicas más importantes sobre los resultados del ACV (EC-JRC-IES, 2010). Este procedimiento se puede realizar cambiando alguna de las suposiciones, recalculando los resultados y comparándolos con los originales. Idealmente, los resultados deberían ser estables; sin embargo, la dependencia de ciertas suposiciones no implica necesariamente que el ACV se haya desarrollado incorrectamente. En dicho caso, se debe tener especial cuidado al explicar bajo qué suposiciones son válidos los resultados (Goedkoop et al., 2016).

Adicionalmente, es recomendable realizar un análisis de consistencia sobre la calidad de los datos usados en las distintas fases del ACV, la aplicación de los LS y criterios de asignación en los sistemas a analizar y, en general, que todos los métodos y suposiciones guarden relación con el objetivo y el alcance del ACV (Heijungs et al., 2008d).

Por último, se deben establecer las conclusiones del estudio, verificando que cumplan con las revisiones señaladas previamente. A partir de estas conclusiones, se pueden realizar recomendaciones y explicarlas a los tomadores de decisiones, cuando esto esté contemplado dentro de los objetivos y el alcance del ACV (ISO, 2006b). Igualmente, se deben señalar todas las limitaciones metodológicas y con respecto a la información empleada, a fin de que el estudio sea transparente y más fácil de entender y replicar.

3.3. ACV aplicado a edificaciones

La aplicación del ACV a las edificaciones, como es el caso del tema central de este trabajo, específicamente al sector residencial unifamiliar, representa un caso de especial atención dado que estas son productos complejos caracterizados por I) cumplir múltiples funciones; II) contener diversos componentes; III) ser producidas localmente, con variaciones en el proceso de construcción; IV) tener límites del sistema frecuentemente poco claros; V) tener una vida útil larga y difícil de predecir, en la que sus características pueden modificarse sustancialmente y en repetidas ocasiones (Monteiro et al., 2021; Petrovic et al., 2019; Zabalza Bribián et al., 2009).

El ACV en el sector construcción puede ser usado por ingenieros, arquitectos, planificadores urbanos, promotores inmobiliarios, municipalidades y consultores para establecer un programa de metas ambientales, definir zonas donde se promueva o prohíba la edificación, certificación energética y evaluar diferentes opciones de sistemas estructurales, remodelación y componentes de

la edificación, siendo especialmente beneficiosas las aplicaciones durante la fase de diseño inicial (Anand & Amor, 2017; Monteiro et al., 2021; Zabalza Bribián et al., 2009).

Considerando la fase de definición de objetivos y alcance, específicamente a la definición de la unidad funcional, es usual optar por considerar la edificación completa, pero también es posible elegir una parte representativa de esta, como 1 m² de área construida, habitable o de calefacción, lo cual puede facilitar la comparación de resultados con estudios similares (Kylili et al., 2017; Soust-Verdaguer et al., 2016). El uso de diferentes UF por parte de los diversos casos individuales de estudio es un obstáculo a superar actual para la comparabilidad del ACV aplicado a edificaciones (Anand & Amor, 2017).

Por otra parte, el ciclo de vida de las edificaciones puede dividirse en cuatro etapas principales y 16 subetapas, según se muestra en la **Figura 16**. Dependiendo del objetivo de cada ACV particular, es posible omitir algunas subetapas. Por ejemplo, la etapa de uso (B1-7) es la que suele mostrar mayor heterogeneidad en sus subetapas incluidas dentro de los límites del sistema, mientras que la etapa de fin de vida (C1-4) tiende a ser omitida justificadamente o simplificada mediante suposiciones de los autores. Por otro lado, la etapa de producción (A1-3) es incluida con mucha mayor frecuencia, casi la totalidad de las veces (Soust-Verdaguer et al., 2016).

Etapa de producción			Etapa de construcción		Etapa de uso							Etapa de fin de vida			
Suministro de materias primas	Transporte	Manufactura	Transporte a sitio de construcción	Instalación en obra	Uso/Aplicación	Mantenimiento	Reparación	Reemplazo	Remodelación	Uso de energía operacional	Uso de agua operacional	Deconstrucción/Demolición	Transporte	Tratamiento de residuos	Disposición
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4

Figura 16: Etapas y subetapas del ciclo de vida de una edificación

Fuente: Adaptado de Petrovic et al., 2019

Anteriormente, la investigación referente a la aplicación del ACV a edificaciones centró sus esfuerzos en mejorar la eficiencia energética de estos edificios y de la mayoría de sus componentes, tales como los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Ello contribuyó a reducir progresivamente los impactos y emisiones asociadas de la etapa de uso (B1-7), que a su vez ocasionó que el enfoque de investigación más reciente se traslade hacia la etapa de construcción (A4-5), debido al mayor impacto relativo que tiene ahora (Anand & Amor, 2017; Trabucco & Wood, 2016).

Asimismo, para la etapa de uso (B1-7) es habitual calcular la demanda de energía eléctrica mediante herramientas dinámicas de simulación termal, que son capaces de adaptarse a las condiciones de eficiencia regionales de cada caso (Soust-Verdaguer et al., 2016). Es importante evaluar, según los objetivos de cada ACV, los elementos a incluir dentro de esta etapa. Estos pueden ser electrodomésticos, iluminación, energía para cocinar, sistemas HVAC, etc., siendo estos últimos los más frecuentemente incluidos. Para el sector residencial, los resultados de esta

etapa están directamente relacionados con I) las características regionales, como el clima y la matriz energética, que puede variar durante la vida útil de la edificación; II) las propiedades termales de la envolvente del edificio, especialmente en climas fríos, ya que en ellos se emplea más energía para la calefacción; y, III) en casos particulares, el comportamiento de los usuarios de la edificación a través de sus patrones de consumo (Anand & Amor, 2017; Monteiro et al., 2021; Soust-Verdaguer et al., 2016).

Como se mencionó en la sección anterior, dada la gran cantidad de información que se requiere manejar para realizar un ACV, el uso de software especializado se vuelve necesario. Para el caso de ACV aplicado a edificaciones existen herramientas específicas, cuya lista se muestra en la **Tabla 3**. Entre las ventajas de estas herramientas están la posibilidad de importar datos de otras aplicaciones de diseño de edificios y la incorporación de bases de datos de materiales de construcción (Anand & Amor, 2017).

Tabla 3: Software especializado para ACV de edificaciones

Software para ACV de edificaciones	Sitio web
ECO-QUANTUM	www.ecoquantum.nl
LEGEP	www.legep.de
EQUER	www.izuba.fr
OGIP	www.ogip.ch/
ECO-SOFT	www.ibo.at/de/ecosoft.htm
BeCost	www.vtt.fi/rte/esitteet/ymparisto/lcahouse.html
GREENCALC	www.greencalc.com
Athena (Impact Estimator for Buildings)	www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/
Invest 2	investv2.bre.co.uk/account.jsp
BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)	www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm/
EcoEffect	www.ecoeffect.se/

Fuente: Adaptado de Anand & Amor, 2017; Zabalza Bribián et al., 2009

Para simplificar la aplicación del ACV a edificaciones se recomiendan estrategias como I) optimizar la adquisición de datos, centrándose en los elementos más grandes del edificio; II) sintetizar el análisis de inventario, concentrándose en las sustancias con mayor contribución para

cierta categoría de impacto u omitiendo materiales auxiliares; III) reducir los cálculos, concentrándose en pocas categorías de impacto; y IV) utilizar herramientas, como las aplicaciones CAD y BIM, que permitan ahorrar tiempo en la cuantificación de materiales (Soust-Verdaguer et al., 2016; Zabalza Bribián et al., 2009). Estas simplificaciones incentivan el uso del ACV aplicado a edificaciones por parte de los usuarios involucrados en el área de diseño inicial de edificios, quienes suelen tener prejuicios sobre la complejidad de este procedimiento. Es importante recordar que los resultados finales del ACV reflejarán el nivel de simplificación empleado, por lo que existe un reto en definir el modelo de tal forma que las simplificaciones no alteren sustancialmente la confiabilidad, transparencia y comparabilidad de dichos resultados (Anand & Amor, 2017; Soust-Verdaguer et al., 2016).

Pese a que la aplicación del ACV a edificaciones ha sido extensivamente estudiada durante la última década, aún existen muchos problemas pendientes de solución, retos y limitaciones por superar (Anand & Amor, 2017). En cuanto a la fase de inventario, específicamente para la etapa de construcción (A4-5), en la que se depende bastante de la información disponible sobre materiales y componentes del edificio, persisten la dificultad para conseguir datos, la falta de estos y las restricciones para su uso debido a confidencialidad (Anand & Amor, 2017; Trabucco & Wood, 2016). Por otro lado, considerando la fase de análisis de impacto, existen categorías de impacto que no suelen incluirse dentro de la evaluación, tales como I) el efecto rebote, que consiste en el incremento de la actividad económica debido a medidas de eficiencia de rentabilidad, que a su vez puede ocasionar impactos ambientales en otros sectores; II) el valor temporal del carbono, que incorpora los objetivos de mitigación de carbono propuestos para un periodo determinado; III) calidad del aire interior; o IV) los impactos locales del edificio en cuestión (Anand & Amor, 2017).

En general, la aplicación del ACV a edificaciones tiene que superar barreras como I) prejuicios sobre su complejidad, precisión y resultados arbitrarios; II) cálculos excesivamente complicados; III) baja demanda del ACV; IV) falta de requerimientos legales; V) dificultad de entender y aplicar los resultados; VI) falta de estandarización en metodologías; y, VII) poco conocimiento sobre impactos y posibilidades ambientales y su cálculo (Zabalza Bribián et al., 2009). Conforme se sigan realizando avances en estos aspectos, se estará más cerca de superar el desafío de establecer al ACV como un enfoque de análisis ambiental de uso convencional en la industria de la construcción (Anand & Amor, 2017).



4. Caso de estudio

En esta sección se plantea una situación hipotética de emergencia a fin de que la comparación de las viviendas temporales esté enmarcada dentro de un contexto único y sea, por lo tanto, lo más equitativa posible. Para ello, se revisan aspectos clave de la situación actual nacional en materia de riesgos por desastres. La definición y el análisis de este contexto permite también establecer consideraciones, suposiciones y limitaciones de manera realista, lógica y consistente, las cuales son importantes para las distintas fases del ACV realizado.

Posteriormente, se seleccionan y describen tres modelos específicos de vivienda de emergencia, considerando la revisión bibliográfica realizada y el contexto previamente definido. Con ello, es posible realizar el ACV de cada una de las alternativas y comparar sus resultados.

4.1. Contexto del estudio

Dado que el objeto de estudio, las viviendas provisorias, es parte de la respuesta frente al riesgo de desastres naturales, se ha optado por agrupar los puntos a analizar según las definiciones de peligro y vulnerabilidad que son de uso frecuente en el campo de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) en Perú. En síntesis, peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o antrópico, potencialmente dañino, de una magnitud dada, en una zona o localidad conocida, que puede afectar un área poblada, infraestructura física y/o el medio ambiente (INDECI, 2006). El peligro también es llamado amenaza y se refiere a una característica de un lugar específico, independientemente de lo que sobre dicha ubicación se construya (Kuroiwa, 2002). Por su parte, la vulnerabilidad es el grado de debilidad de uno o varios elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada; es decir, es la facilidad con que un elemento puede sufrir daños (INDECI, 2006). Asimismo, la vulnerabilidad está asociada a las edificaciones construidas por el ser humano

y depende de las características de su diseño, la calidad de los materiales y de la técnica de construcción (Kuroiwa, 2002). Estos dos conceptos son los principales factores que determinan el riesgo, que, conceptualmente, es el nivel probable de daño que sufriría un elemento expuesto ante el impacto de un peligro potencial en un área y período de exposición determinados (INDECI, 2004). Bajo este enfoque es común expresar que el riesgo es igual al peligro multiplicado por la vulnerabilidad, especialmente cuando estas se entienden como probabilidades (INDECI, 2006).

Se recalca que el siguiente no es análisis exhaustivo de riesgos por desastres naturales, sino una selección de un subconjunto de sus componentes que resultan de especial interés para el alcance del presente trabajo y que permite cumplir con los objetivos de esta investigación. Es importante mencionar también que, pese a que aquí se enumeran principalmente problemas y obstáculos a superar, actualmente existen diversos trabajos e iniciativas para llegar a soluciones en cada caso presentado.

4.1.1. Contexto a nivel nacional

Para comprender la ocurrencia de los desastres naturales en Perú, se debe considerar al elemento clave que es su ubicación dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, llamado así por la elevada actividad sísmica y volcánica que lo caracteriza. Esto se debe a que, a lo largo de gran parte del borde de este océano, existen numerosas zonas de subducción entre placas tectónicas. Es en estas zonas donde ocurren los terremotos más energéticos y donde se encuentran los volcanes más peligrosos del mundo (Crameri, Shephard, & Conrad, 2019).

En el caso de Perú, este se encuentra adyacente a la zona de subducción entre la placa continental de Sudamérica y la plaza oceánica de Nazca. El fenómeno de subducción es el responsable de la aparición de la cordillera de los Andes y de los volcanes que se encuentran en ella (Tarbuck &

Lutgens, 2005). Estos se encuentran en el sur de la sierra peruana y, de este grupo, al menos siete han presentado actividad volcánica eruptiva durante los últimos 500 años (OVI, 2012). A su vez, la orogénesis andina ha sido considerada como el principal proceso que ha guiado el desarrollo del actual paisaje amazónico, incluyendo la formación de su sistema de ríos, esto debido a que los Andes funcionan como barrera para la humedad proveniente del océano Atlántico, lo cual propicia la precipitación orográfica característica del lado este de la cordillera (Bicudo, Sacek, & Paes de Almeida, 2020). La configuración resultante de este contexto del océano pacífico junto a las tres regiones naturales peruanas, costa, sierra y selva, propicia también desastres como huaicos, inundaciones, heladas, friajes y tsunamis, además de los ya mencionados terremotos y erupciones volcánicas cuya distribución temporal y geográfica se muestra en las **Figuras 17 y 18**, respectivamente.

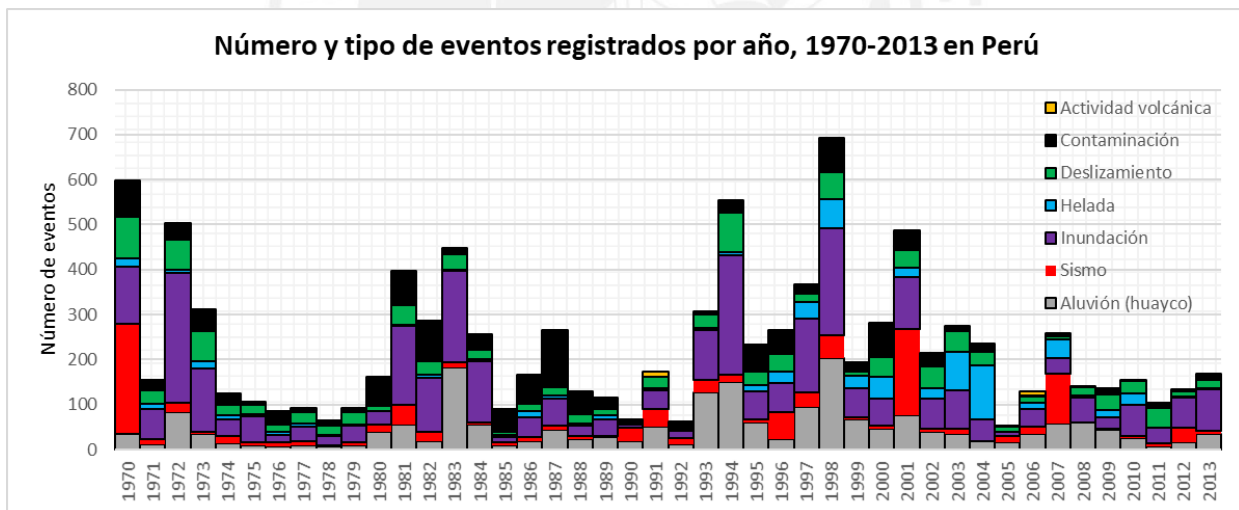


Figura 17: Historia de desastres naturales por tipo en Perú

Fuente: Adaptado de DesInventar, 2020

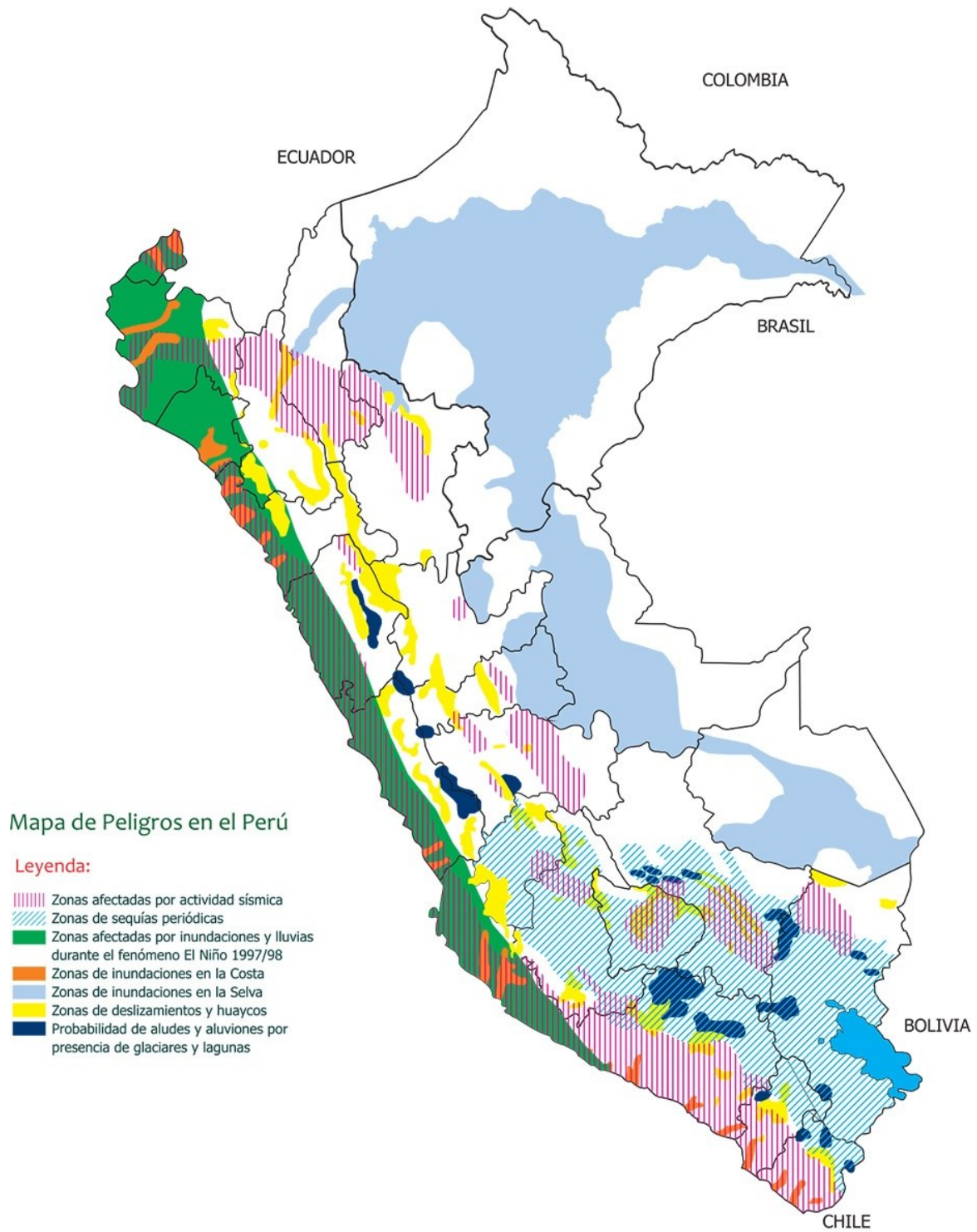


Figura 18: Mapa de peligros en el Perú

Fuente: Tomado de PREDES, 2016

Asimismo, es importante mencionar al Fenómeno del Niño (FEN), que, si bien es resultado de diferentes interacciones complejas entre la atmósfera y el océano pacífico ecuatorial, con consecuencias en varias regiones del mundo, para el análisis a nivel local del presente trabajo puede ser visto como un incremento en la temperatura del agua marina frente a las costas del norte del Perú y Ecuador (SENAMHI, 2014). Este fenómeno se presenta entre intervalos variables de 2 a 7 años, con un total de 25 eventos durante todo el siglo XX, y es marcadamente más fuerte que el calentamiento normal de esa región marina que ocurre todos los años (Changnon, 2000). Sus principales consecuencias son un incremento del nivel del mar en la zona de calentamiento, variaciones en salinidad y contenido de oxígeno del océano, disminución de la presión atmosférica, incremento de la temperatura del aire en las zonas costeras adyacentes al mar caliente, incremento del contenido de humedad del aire y de la nubosidad durante verano y primavera, entre otras. Todas estas variaciones terminan ocasionando otra larga serie de impactos, tales como la aceleración del retroceso glaciar, salinización de suelos, muerte o migración de especies animales y vegetales, incremento de enfermedades como el cólera y la malaria, etc. (SENAMHI, 2014). Resaltan de esta última lista la ocurrencia de huaicos, desbordes de ríos e inundaciones en la costa norte del Perú.

Por otro lado, una vulnerabilidad importante a nivel nacional es la irregular distribución demográfica actual, la cual es resultado de una marcada tendencia en la evolución histórica de la población según región natural (costa, sierra y selva). De acuerdo con la información de los censos nacionales del INEI que se muestra en la **Tabla 4**, esta se ha caracterizado por un sostenido crecimiento del porcentaje de la población que vive en la costa, desde 28,3% en 1940 hasta 58,0% en 2017, a su vez que, para el caso de la sierra, el porcentaje se ha reducido desde 65,0% a 28,1% en el mismo periodo (INEI, 2018).

Tabla 4: Evolución de la población censada según región natural

Año de censo	1940	1961	1972	1981	1993	2007	2017
Costa	1,759,573 28.3%	3,859,443 39.0%	6,242,993 46.1%	8,462,304 49.8%	11,547,743 52.4%	14,973,264 54.6%	17,037,297 58.0%
Sierra	4,033,952 65.0%	5,182,093 52.3%	5,953,293 44.0%	6,746,623 39.7%	7,668,359 34.8%	8,763,601 32.0%	8,268,183 28.1%
Selva	414,452 6.7%	865,210 8.7%	1,341,922 9.9%	1,796,283 10.6%	2,832,254 12.8%	3,675,292 13.4%	4,076,404 13.9%
Total	6,207,977	9,906,746	13,538,208	17,005,210	22,048,356	27,412,157	29,381,884

Fuente: Adaptado de INEI, 2018

Asimismo, en Perú es usual que la población esté concentrada dentro de las ciudades capitales de cada departamento; sin embargo, esta tendencia se acrecienta en la costa, donde la población combinada de la ciudad más poblada de cada uno de los diez departamentos costeros, que en cada caso es la misma que la capital departamental, a excepción de Chimbote en Ancash (ver **Tabla 5**), representa al 78,5% del total regional, frente al promedio nacional de 54,6% (INEI, 2018).

Tabla 5: Ciudades más pobladas de la costa por departamento

Departamento	Ciudad capital	Población 2017
Tumbes	Tumbes	96,946
Piura	Piura	473,025
Lambayeque	Chiclayo	552,508
La Libertad	Trujillo	919,899
Áncash	Huaraz	118,836
Lima	Lima (inc. Callao)	9,562,280
Ica	Ica	282,407
Arequipa	Arequipa	1,008,290
Moquegua	Moquegua	69,882
Tacna	Tacna	286,240
Total		13,370,313

Fuente: Adaptado de INEI, 2018

Por otra parte, en cuanto a la vulnerabilidad estructural de las viviendas de los peruanos, se debe resaltar el empleo de materiales como el adobe, que a lo largo de la historia peruana ha sido

ampliamente usado por su accesibilidad y por permitir crear ambientes con propiedades ambientales favorables, como la mitigación del ruido y la intensa temperatura exterior (MVCS, 2010). En la actualidad se tiene que, a nivel nacional, el 23% de las viviendas particulares ocupadas tienen al adobe como material predominante en muros exteriores, según se muestra en la **Tabla 6**. Esta proporción aumenta en los departamentos de la sierra, como ejemplos están Apurímac y Cusco con 75% y 67% de viviendas de adobe en relación al total departamental, respectivamente (INEI, 2018). Estas construcciones son propias de las comunidades rurales altoandinas y son particularmente débiles ante acciones sísmicas ya que suelen presentar comportamientos indeseables como falla frágil y súbita o falla de muros en dirección perpendicular a su plano (Santa Cruz, 2011c).

El deficiente desempeño sísmico del adobe ha sido observado también en otros países sudamericanos, en donde la ocurrencia de sismos ha evidenciado a las viviendas de albañilería sin reforzar, grupo que comprende a las edificaciones típicas hechas de adobe, como la clase más vulnerable, junto a las viviendas autoconstruidas (Villar-Vega & Silva, 2017). En el contexto global, un caso lamentablemente notable fue el del terremoto de Bam, Irán en 2003, en el que aproximadamente el 30% de los 100 000 habitantes de ese entonces fueron víctimas fatales y, de estas muertes, se estima que un 50% fueron causadas por el colapso de estructuras de adobe (Hosseini et al., 2021). Pese a ello, es importante mencionar que el empleo de adobe como material de construcción no es intrínsecamente negativo, son los casos en los que se usa sin asistencia técnica adecuada los que son frecuentes y contribuyen a situaciones de riesgo. En Perú, la construcción con adobe se rige por la norma E.080 “Diseño y construcción con tierra reforzada”; sin embargo, es común que las viviendas sean construidas sin seguir esta y otras normas, como se discute en los párrafos siguientes.

Tabla 6: Material predominante en muros exteriores de viviendas particulares ocupadas a nivel nacional

Material	N° de viviendas	Porcentaje (%)
Ladrillo o bloque de cemento	4,298,274	55.83
Piedra o sillar con cal o cemento	43,170	0.56
Adobe	1,791,829	23.27
Tapia	356,665	4.63
Quincha	164,538	2.14
Piedra con barro	77,593	1.01
Madera	727,778	9.45
Triplay / calamina / estera	239,012	3.10
Caña partida / hoja de palma / otros	41	0.00
Total	7,698,900	100.00

Fuente: Adaptado de INEI, 2018

Una clase de vulnerabilidad distinta de las viviendas puede delimitarse a partir del régimen de tenencia de las viviendas. A nivel nacional, la mayoría de viviendas particulares son propias, es decir, son habitadas por sus propietarios, en oposición a otras opciones como las viviendas alquiladas. Sin embargo, una fracción importante de estas viviendas (37,5%) no cuentan con título de propiedad (INEI, 2018), es decir, son informales, tal cual se aprecia en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Régimen de tenencia y titularidad de la propiedad de viviendas particulares ocupadas

Régimen de tenencia	N° de viviendas	Porcentaje (%)
Alquilada	1,256,520	16.32
Propia sin título de propiedad	2,888,278	37.52
Propia con título de propiedad	2,964,813	38.51
Cedida	579,244	7.52
Otra forma	10,045	0.13
Total	7,698,900	100.00

Fuente: Adaptado de INEI, 2018

Frecuentemente acompañando a la informalidad, se tiene el problema de la autoconstrucción, la cual prescinde de profesionales calificados para el diseño, construcción y supervisión de las

viviendas, así como del empleo de las normas y reglamentos para dichos fines. Existen estimados que sitúan al porcentaje de viviendas autoconstruidas en el Perú entre 60-80% (Gestión, 2017; La República, 2013). Incluso en el caso más optimista, esta cifra sigue siendo bastante elevada. Esta situación, junto a la falta de supervisión por parte de las autoridades, resulta en edificaciones construidas sin diseños previos o cálculos estructurales, procesos constructivos no controlados y deficientes y falta de criterio profesional ingenieril en diversos aspectos como, por ejemplo, una estructuración adecuada. Estas condiciones empeoran aun más debido al uso de viviendas a medio construir; la presión por optimizar al máximo el espacio disponible, que resulta en edificaciones muy esbeltas y con problemas de piso blando; la falta de mantenimiento en viviendas habitadas por inquilinos precarios; el cambio de uso de la edificación que no estuvo contemplado inicialmente que resulta en una mayor sobrecarga; las excavaciones vecinas para sótanos mal ejecutadas que afectan negativamente a las edificaciones cercanas; y las modificaciones que resultan en la demolición o reducción de los elementos estructurales (Santa Cruz, 2011a). La **Figura 19** muestra un ejemplo de vivienda informal.



Figura 19: Vivienda con muros de arcilla en segundo nivel y muros de adobe en primer nivel en comunidad rural del Perú

Fuente: Tomado de Santa Cruz, 2011b

4.1.2. Contexto específico en la ciudad de Lima

El área metropolitana de Lima y Callao alberga a 9 569 468 habitantes (INEI, 2018) que representan al 32,6% de la población nacional, además de concentrar gran parte de las actividades económicas y productivas del país, lo que se evidencia en el 46,2% del PBI nacional que es aportado por esta región (INEI, 2019). Además, al ser una capital departamental costera y la ciudad más grande del Perú, aparecen problemas nuevos asociados a la enorme magnitud de la población y sus necesidades en cuanto a recursos y espacios, que son relevantes para el presente tema de estudio, por lo que se consideró pertinente mencionarlos en una sección específica.

Si bien toda el área de Lima Metropolitana y, en general, la costa peruana, están expuestas al peligro sísmico mencionado en la sección anterior, se debe tener en cuenta también el efecto de las condiciones locales geológicas y topográficas, pues estas pueden amplificar las sollicitaciones

sísmicas a las que están sometidas las edificaciones (Muñoz, 2011). Por ello, se han realizado diversos estudios de microzonificación sísmica en la ciudad de Lima, dividiendo el terreno en cinco zonas principales según los perfiles estratigráficos de suelo predominantes, según se indica en la

Tabla 8.

Tabla 8: Zonificación sísmica de Lima Metropolitana

Zona sísmica	Nivel de peligro	Suelos característicos	Distritos de ejemplo
I	Bajo	Afloramientos rocosos, estratos de grava en los conos de deyección de ríos y en pies de laderas	Pueblo Libre, Lince, La Victoria
II	Medio	Estratos superficiales granulares finos y arcillosos sobre grava aluvial o coluvial	La Perla, San Juan de Miraflores
III	Alto	Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor, depósitos de arena eólica en estado suelto	Puente piedra, La Molina, Villa el Salvador, Ventanilla
IV	Muy alto	Depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos marinos y suelos pantanosos	Zonas litorales de Ventanilla, Callao, Chorrillos, Villa el Salvador
V	Zona crítica puntual	Zonas puntuales, rellenos sanitarios, depósitos de rellenos sueltos de desmonte heterogéneo colocados en depresiones naturales o excavaciones.	

Fuente: Adaptado de PREDES, 2009

Un caso ejemplar de la marcada diferencia que pueden generar estas condiciones locales es el distrito de La Molina, el cual tiene una historia de daños excesivos frente a terremotos como los de los años 1940 ($M_S=8,0$), 1966 ($M_S=8,0$) y 1974 ($M_S=7,8$) que dejaron registro de intensidades de MM IX en comparación a las intensidades de MM VI-VIII registradas en zonas cercanas al centro de Lima (Stephenson, Benites, & Davenport, 2009).

Por otro lado, es necesario también considerar los tsunamis asociados a estos terremotos, especialmente teniendo en cuenta el extenso registro de 117 tsunamis generados por sismos durante los últimos 500 años a lo largo de la costa peruana y que, en este caso particular, Lima Metropolitana tiene más de 80 km de costas habitadas desde Ancón hasta Lurín (PREDES, 2009). Se ha determinado que los distritos Limeños más vulnerables son Ventanilla, Callao, Chorrillos y Villa el Salvador, según se indica en la **Figura 20**, que muestra el límite de inundación por tsunami

asociado a un sismo $M_w = 8,5$ superpuesta a la zonificación sísmica distrital (INDECI & PNUD, 2011).

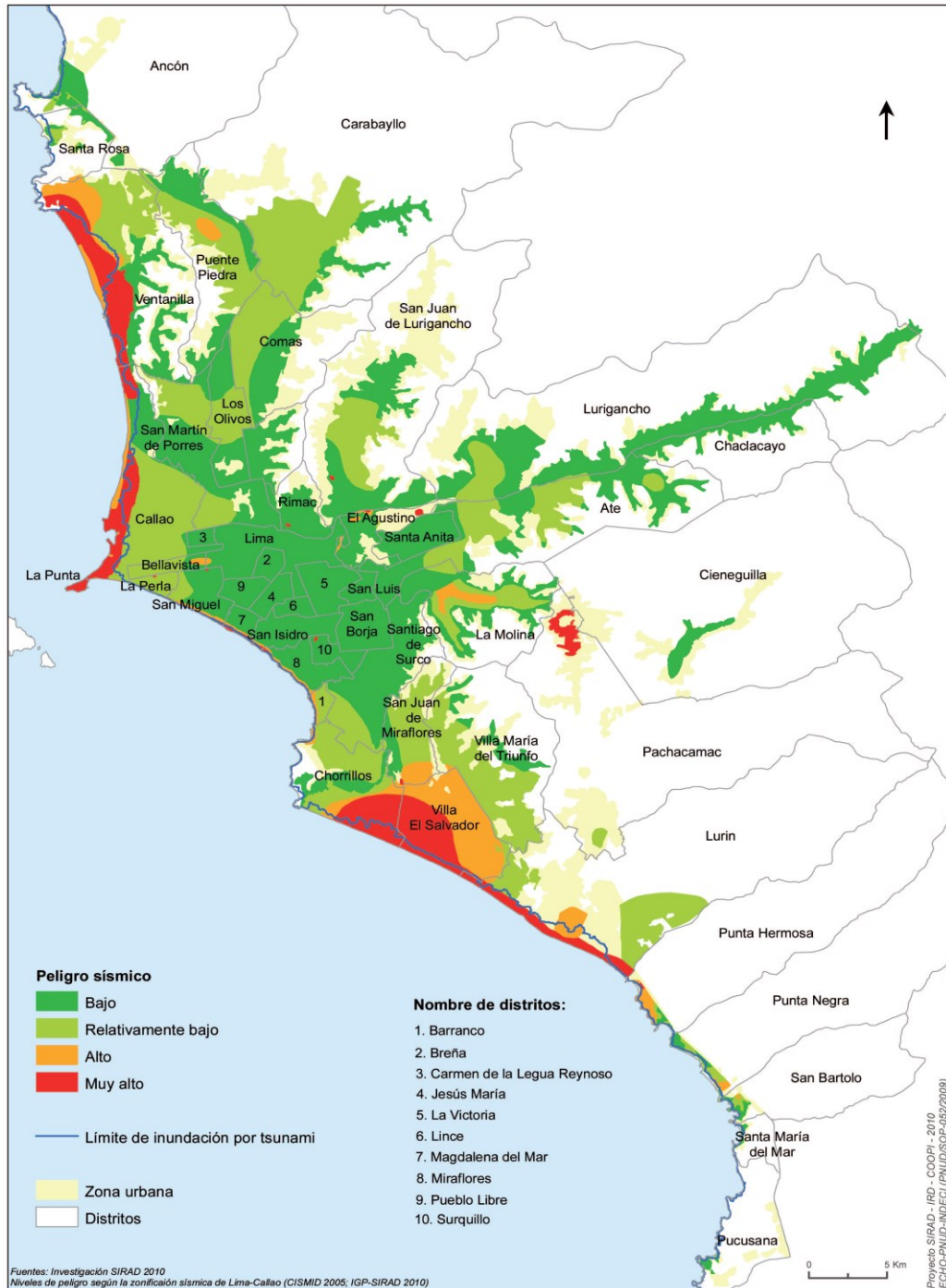


Figura 20: Zonificación sísmica y límite de inundación por tsunami en Lima

Fuente: Tomado de INDECI & PNUD, 2011

En cuanto a las vulnerabilidades en Lima, en el aspecto socioeconómico destacan indicadores tales como la falta de servicios de electricidad, agua y desagüe; niveles bajos de educación; la tasa de viviendas habitadas por invasión; el promedio de habitantes por vivienda; y la accesibilidad del distrito. Estos presentan una repartición espacial centro-periferia, encontrándose la población más vulnerable hacia el exterior de la ciudad, particularmente en los lugares de reciente crecimiento urbano (INDECI & PNUD, 2011). Por ello, a grandes rasgos puede describirse a Lima como una mezcla de distritos bien organizados y estructurados con otros desorganizados, informalmente construidos y congestionados de tráfico (Liguori et al., 2019).

Resalta particularmente la presencia de un elevado número de asentamientos humanos (AA.HH.) en los distritos periféricos. Varios de estos se ubican en laderas de cerros, imponiendo temerariamente una cuadrícula de lotes sobre las pendientes más empinadas, resultando en escaleras excesivamente inclinadas y sin descansos intermedios, además de tener rutas de evacuación que dirigen hacia callejones sin salida o a través de trayectos peligrosos, como se aprecia las **Figuras 21 y 22** (Lambert, 2021). Esta situación es aun más grave considerando que se estima en 30% a la población de Lima Metropolitana que vive en laderas (El Comercio, 2016).



Figura 21: Delimitación de lotes en AA.HH. (izq.) y ruta de evacuación bajo muro de contención de piedras sueltas (der.)

Fuente: Tomado de Lambert, 2021



Figura 22: Escaleras de un AA.HH. ubicado en San Juan de Lurigancho

Fuente: Tomado de Lambert, 2021

Según Lambert (2021), estos problemas empezaron a hacerse más evidentes con los AA.HH. formados luego de la década de 1980, los cuales muestran el uso inflexible de esta cuadrícula impuesta sobre la pendiente, que difieren bastante de los AA.HH. de, por ejemplo, la década de 1950, que se adapta mejor a la morfología de la pendiente y es capaz de variar su patrón regular. Dicha autora resalta la contribución negativa de la legislación, dando como ejemplo la Ley de Barriadas N°13517, que si bien en un inicio fue útil para la formalización de algunos AA.HH. de esa época, terminó siendo aprovechada malintencionadamente para el surgimiento de nuevas invasiones en las laderas periféricas de Lima (Lambert, 2021).

Evidentemente, urbanizar estos terrenos trae consigo una serie de riesgos como caídas y derrumbes, además de dificultar la accesibilidad y varias tareas del quehacer diario en general (Lambert, 2021). Cuando, adicionalmente a esto, la zona es propensa a lluvias fuertes, como en algunas quebradas de Lima, existe riesgo de que ocurran huaicos, tal como sucedió el 23 de marzo de 2015 en la localidad de Chosica a la altura del km 36 de la Carretera Central (El Comercio, 2015a). La **Figura 23** muestra una de las calles afectadas por este suceso. En aquella ocasión, varias quebradas habían sido urbanizadas formalmente por al menos diez años, con títulos de propiedad y servicios

incluidos, pese a que los riesgos inherentes a construir ahí habían sido documentados con anterioridad, por lo que el desastre sería resultado de la excesiva tolerancia o normalización del riesgo por parte de la población y políticos locales junto al gobierno (Miranda Sara, Jameson, Pfeffer, & Baud, 2016). Esta situación se torna más preocupante al considerar que algunas de las quebradas afectadas en 2015, entre ellas Quirio y Pedregal, ya han sido escenario de huaicos importantes como el del 9 de marzo de 1987, dejando en ambos casos varios heridos, muertos y viviendas destruidas (Abad Pérez, 2009; El Comercio, 2015b).



Figura 23: Efectos del huaico del 23 de marzo de 2015 en Chosica

Fuente: Tomado de Miranda Sara et al., 2016

Prosiguiendo con las distintas formas de vulnerabilidad, varias de estas han sido analizadas a partir del supuesto de la ocurrencia de un gran sismo en Lima. Entre las investigaciones realizadas al respecto destaca la realizada por la ONG Centro de Estudios y Prevención de Desastres. En dicho estudio, luego de considerar la historia sísmica de Lima y áreas vecinas durante los últimos siglos, se determina como evento sísmico máximo probable a uno de magnitud $M_w = 8,0$ con epicentro frente a Lima e hipocentro a 33 km de profundidad (PREDES, 2009).

Similarmente, un proyecto conjunto entre INDECI y PNUD analizó los recursos esenciales para una emergencia de estas características, teniendo en cuenta cuáles de ellos son indispensables para el funcionamiento de la ciudad en situación normal, a diferencia de los que son específicos de estas situaciones, teniendo estos últimos una subdivisión adicional en caso sean esenciales o de apoyo. Estos recursos son resumidos en la **Tabla 9**. Adicionalmente a estos, se deben considerar las áreas para potenciales albergues en campamento, áreas para escombreras y las áreas económicas de mayor interés en Lima Metropolitana (INDECI & PNUD, 2011). Para complementar este análisis, se han considerado como principales vulnerabilidades asociadas a estos recursos a su ubicación respecto a zonas de alto peligro sísmico o de inundación por tsunami, su grado de accesibilidad y la vulnerabilidad estructural y funcional de los mismos, en los casos que son aplicables (INDECI & PNUD, 2011).

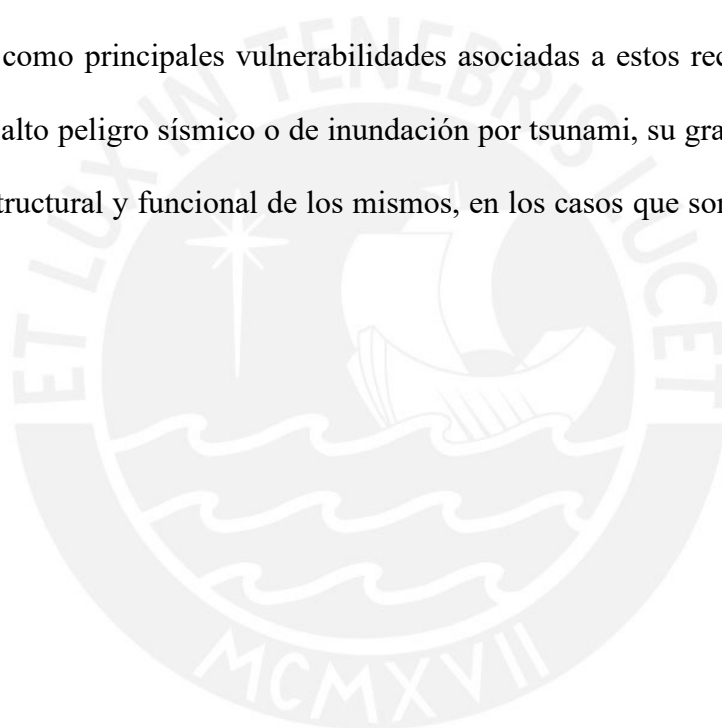


Tabla 9: Recursos para el manejo de emergencias en Lima y su clasificación

Recursos para el manejo de emergencias	Elementos esenciales en periodo normal	Recursos específicos de emergencia	Recursos de apoyo
Centros de decisión e intervención en caso de emergencia	Gobierno nacional, ministerios, INDECI Gobiernos regionales y locales Cuarteles de bomberos PNP	Cuarteles FF.AA. Grupos de rescate Actores de ayuda humanitaria Almacenes de ayuda humanitaria Aeropuerto Internacional Jorge Chávez	Empresas de camiones cisternas y maquinaria pesada Helipuertos Aeropuerto Las Palmas
Sistema de abastecimiento de agua	Planta La Atarjea Red primaria de abastecimiento de agua Principales pozos	Lugares de mantenimiento de la red de abastecimiento (centros de servicio SEDAPAL) Planta Chillón Reservorios con capacidad mayor a 2500 m ³ Surtidores operativos y de reserva	Camiones cisterna Empresas de agua embotellada
Sistema de abastecimiento de alimentos	Mercados mayoristas Mercados de distribución Supermercados	Almacén de ayuda alimentaria Almacén móvil de ayuda alimentaria Sede y oficina de ayuda alimentaria	Centros de acopio PRONAA Proveedores de alimentos Almacenes de supermercados y de fábricas de alimentos
Atención médica	Hospitales principales Almacenes de insumos médicos Bancos de sangre públicos Actores de decisión principales	Hospitales de campaña Zonas de expansión de hospitales	Bancos de sangre privados Ambulancias Establecimientos de salud de apoyo
Sistema de abastecimiento de energía	Red eléctrica primaria Subestaciones de transformación eléctrica Almacenes de hidrocarburos Refinerías	Centrales de generación eléctrica Almacenes de hidrocarburos	Empresas de alquiler de tanques para gasolina y generadores eléctricos Locales de venta de gas en cilindro Grifos
Recursos de transporte	Red vial principal Puertos Aeropuerto Internacional Jorge Chávez	Mantenimiento vial Helipuertos Vías de evacuación Principales terminales interurbanos Aeropuerto Las Palmas	Resto de la red vial Empresas de bus urbano Mayores empresas de carga
Recursos de telecomunicaciones	Mayores emisoras de radio y TV Centrales de conmutación de telefonía móvil Punto de fibra óptica en Lurín	Estaciones base de telefonía móvil que sirven a los lugares de decisión Telecomunicaciones por satélite Radios de emergencia INDECI, gobiernos locales, bomberos, MINSA	Resto de emisoras de radio y TV

Fuente: Adaptado de INDECI & PNUD, 2011

Analizando el caso específico de los hospitales, un estudio realizado por Liguori et al. (2019) basado en 41 de los 59 hospitales públicos y semipúblicos de Lima Metropolitana determinó que la mayoría de pabellones que los componen fueron construidos sin normas de diseño sismorresistente o con normas obsoletas, por lo que se espera un nivel alto de daños ante un sismo $M_w = 8,0$. Ello resultaría en que a las 72 horas del desastre, solo entre 1,3-32,9% de la población con necesidad de atención quirúrgica sería atendida. Lo anterior también es resultado de una insuficiente autonomía de servicios e insumos en la mayoría de hospitales, teniendo que solo 12 de estos superan el periodo mínimo recomendado de autonomía de 72 horas. Asimismo, se resalta que

los hospitales con menor probabilidad de daño están ubicados en el centro de la metrópolis, por lo que aumentaría la probabilidad de que los heridos de distritos circundantes sean trasladados ahí, generando graves problemas de tráfico (Liguori et al., 2019).

Otro posible caso crítico de interés es el de la infraestructura educativa. En Lima, solo el 8% de los pabellones de los locales escolares son sísmicamente seguros, debido a que la gran mayoría de estos, llamados Módulos 780, fueron construidos siguiendo las normas peruanas sismorresistentes previas a la de 1997 y por lo tanto tienen el problema latente de falla por columna corta (Santa Cruz, 2013). Por ello, en caso de la ocurrencia de un sismo $M_I=8,2$, el 92% de los pabellones escolares de Lima y Callao quedarían inoperativos, con alta probabilidad de que el 69% de la infraestructura escolar tenga que demolerse y reconstruirse, mientras que para un sismo ocasional de $M_I=6,5$ serían el 45% de los pabellones los que quedarían inoperativos, cifra aún elevada (PUCP, 2014). Al respecto, se recomienda modificar la normativa actual para que se exija la revisión y eventual reforzamiento estructural de las edificaciones esenciales existentes construidas bajo normas actualmente obsoletas (Santa Cruz, 2014). Asimismo, la falta de mantenimiento adecuado para esta infraestructura representa otro obstáculo a superar, teniendo que aproximadamente el 11% de pabellones escolares presenta desprendimiento del recubrimiento de los elementos de concreto armado y problemas de corrosión en el refuerzo (Santa Cruz, 2013). La **Figura 24** muestra uno de estos casos.



Figura 24: Corrosión de varillas de acero de refuerzo de columna de colegio limeño

Fuente: Tomado de Santa Cruz, 2013

Por otra parte, el estudio desarrollado por PREDES (2009) analizó la vulnerabilidad de las edificaciones residenciales de Lima Metropolitana identificando sectores homogéneos según la densidad poblacional, material de construcción predominante, tipología constructiva, estado de conservación y altura de las viviendas. Fruto de esta investigación se produjeron, entre otros, los mapas del estado de conservación y el material predominante de las viviendas de Lima Metropolitana, según se muestra en las **Figuras 25 y 26**. De acuerdo con estos, se cataloga con estado de conservación deteriorado a distintos sectores de los distritos de Callao, Breña, La Victoria, Chorrillos, Lima, Rímac y Barranco, siendo los tres últimos los únicos distritos con sectores donde el material predominante en las viviendas es el adobe (PREDES, 2009). Es en casos como estos donde la combinación de estos factores resulta en altos niveles de riesgo para los residentes.

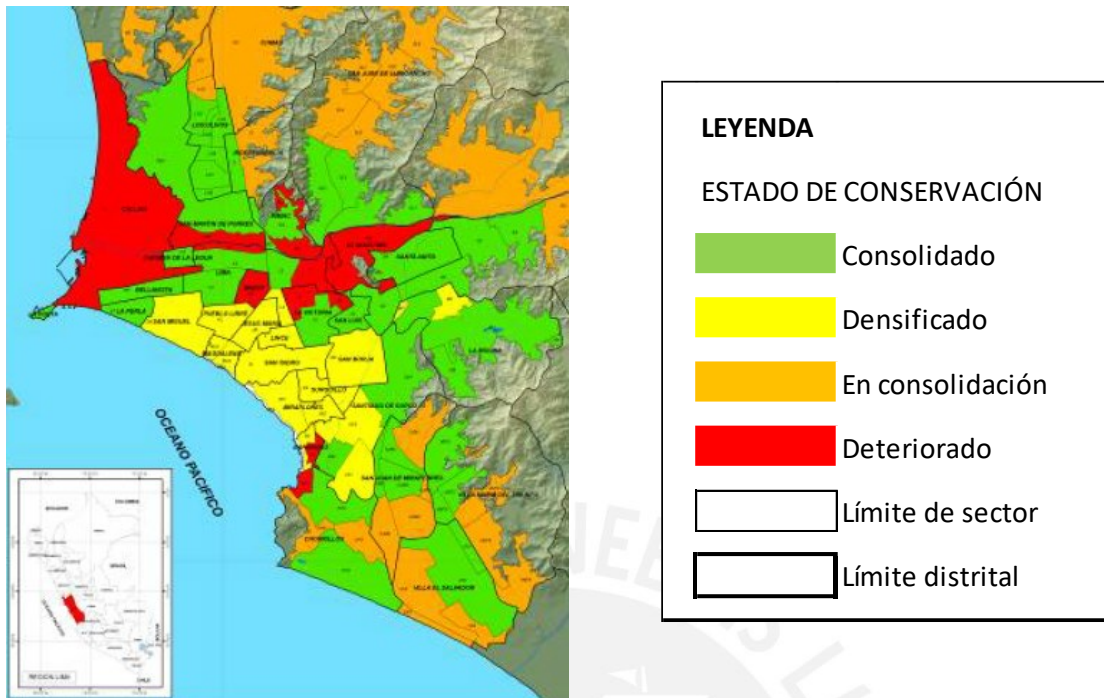


Figura 25: Estado de conservación promedio por sector urbano en Lima Metropolitana

Fuente: Adaptado de PREDES, 2009

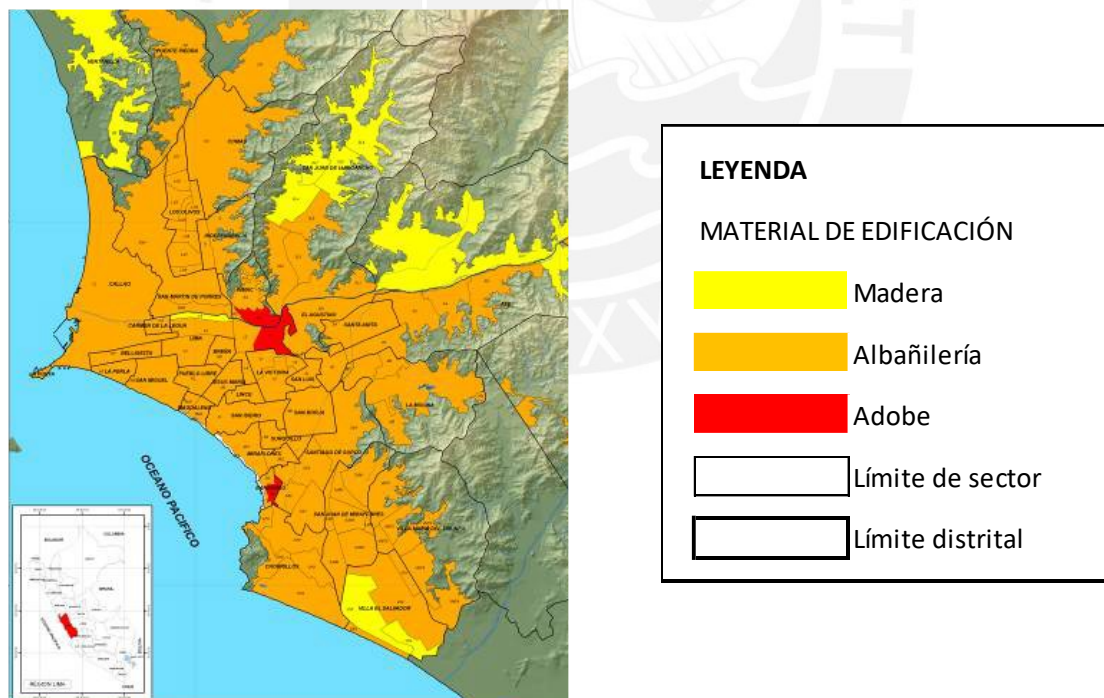


Figura 26: Material de edificación promedio por sector urbano en Lima Metropolitana

Fuente: Adaptado de PREDES, 2009

Teniendo en cuenta la problemática descrita anteriormente, el proyecto INDECI-PNUD (2011) elaboró un mapa que sintetiza los distintos tipos de vulnerabilidad a los que está expuesta la población de Lima según su ubicación en la ciudad, según se muestra en la **Figura 27**. Como casos resaltantes se tiene al distrito de Villa el Salvador, expuesto a alto peligro sísmico y riesgo de tsunami, o el caso del Callao que alberga importantísimos elementos de infraestructura como el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez o el terminal portuario, con este último siendo especialmente susceptible al posible tsunami (INDECI & PNUD, 2011). En dicho estudio se reconoce también que de manera global, son relativamente pocos los recursos esenciales de emergencia que estarían en situación de perder su funcionalidad al considerar únicamente su exposición a los peligros; sin embargo, los retos a superar para garantizar un adecuado manejo de la emergencia serían los asociados a la movilidad y accesibilidad de los recursos de respuesta, la falta de preparación y dificultad de coordinación entre las instituciones que manejan estos recursos. Son las estrechas relaciones de dependencia, transmisión de vulnerabilidad, existencia de alternativas y autonomía entre los distintos recursos, las que determinan el resultado final de la gestión de un desastre. Como ejemplos prácticos, una falla en el abastecimiento de energía eléctrica acarrearía consigo problemas para los sistemas de abastecimiento de agua y telecomunicaciones o una excesiva congestión en la red vial de Lima podría obstaculizar el traslado de heridos y ayuda humanitaria (INDECI & PNUD, 2011).

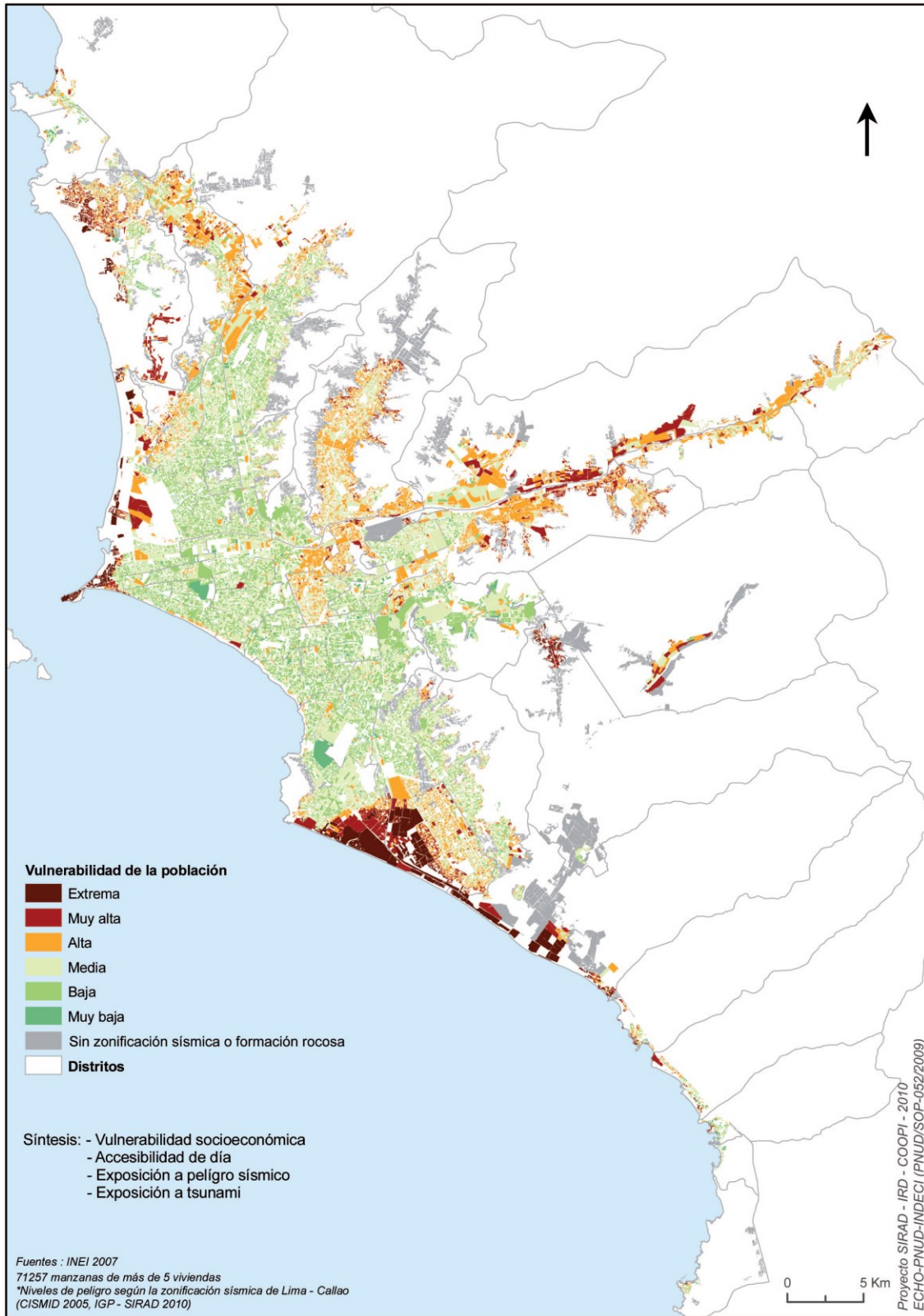


Figura 27: Niveles de vulnerabilidad sintetizada de la población de Lima Metropolitana

Fuente: Tomado de INDECI & PNUD, 2011

4.1.3. Escenario específico planteado

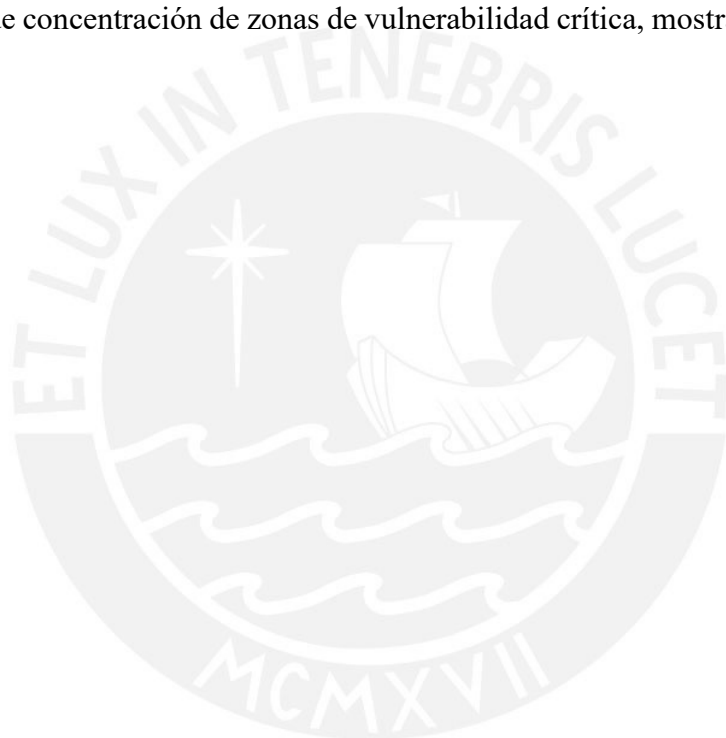
Considerando los factores señalados, se optó por escoger como lugar de la emergencia a la ciudad de Lima, debido a que esta concentra gran parte de la población, infraestructura y actividades económicas a nivel nacional. De todos los peligros, se eligió la ocurrencia de un sismo $M_w = 8,0$ debido a que se le ha señalado como el evento sísmico máximo probable y que, al escogerlo, es posible aplicar resultados previos de los estudios previos realizados dentro de esta línea de investigación, así como aportar a la misma con nuevos hallazgos. Además, el refugio en viviendas temporales es un recurso totalmente aplicable a una emergencia de estas características.

En la situación propuesta, se estiman 51 000 víctimas mortales y 686 000 heridos, además de 200 000 viviendas destruidas y otras 350 000 inhabitables, lo que implicaría alrededor de tres millones de personas desplazadas de sus hogares (PREDES, 2009; INDECI & PNUD, 2011). Ante ello, las Comisiones de Logística y los Centros de Operaciones de Emergencia de los Comités Distritales, Provinciales y Regionales de Defensa Civil son las instituciones encargadas de instalar, mantener y cerrar albergues temporales para los damnificados, cuyas ubicaciones potenciales fueron determinadas como parte del trabajo realizado por INDECI & PNUD (2011) y se muestran en la **Figura 28**.

Se enfatiza que, dado el elevado número de afectados, se han priorizado los albergues en campamento, es decir, en lugares abiertos, y no los albergues en infraestructura. Asimismo, se ha limitado la selección de áreas potenciales a terrenos mayores a 2 ha. Considerando una densidad de 100 familias por hectárea y 5 personas por familia, es decir, 20 m² de área de albergue para cada persona, es posible albergar a 1 740 000 personas, por lo que solo se cubriría alrededor del 58% de la demanda de vivienda temporal esperada para la emergencia (INDECI & PNUD, 2011). Además, de las 214 áreas potenciales identificadas, solo el 6% ha sido oficialmente definida para dicho fin

por las autoridades distritales o provinciales. Sobre el área total disponible para albergues en campamento, se determinó que el 69,7% corresponde a propiedad pública, con un importante aporte de terrenos militares (INDECI & PNUD, 2011).

Para la realización de ACV de las viviendas temporales, se consideró que todos los damnificados serán albergados en solo dos de estas áreas potenciales, señalados dentro de un círculo rojo en la **Figura 28**. Estas fueron escogidas debido a que poseen las mayores extensiones y a su distribución cercana los puntos de concentración de zonas de vulnerabilidad crítica, mostradas en la **Figura 27**.



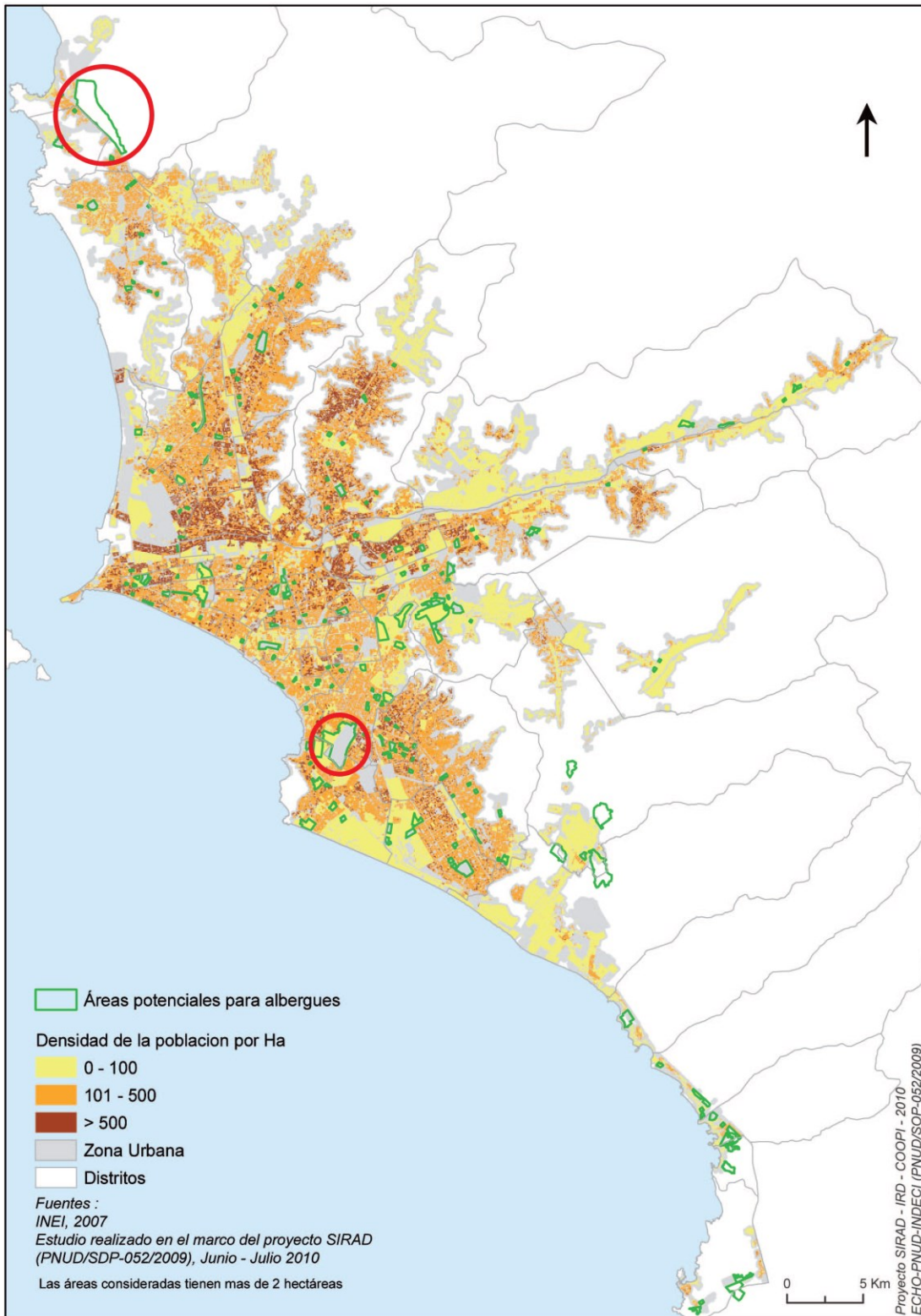


Figura 28: Áreas potenciales para albergues en campamento en la ciudad de Lima

Fuente: Adaptado de INDECI & PNUD, 2011

4.2. Selección de viviendas a analizar

Para la comparación del presente trabajo fueron escogidos tres modelos existentes de vivienda temporal de emergencia, cuyo material principal es la madera. Esta elección se apoya en investigaciones anteriores que han indicado que las edificaciones de madera I) son fáciles y rápidas de construir; II) permiten minimizar puentes térmicos y usar capas de aislamiento sin aumentar el grosor de la envolvente del edificio; III) utilizan recursos renovables; IV) ahorran costos relacionados a la mano de obra para la construcción y la operación por parte de los ocupantes; V) impactan menos en el ambiente en comparación con la construcción con acero y concreto, por lo que representan una oportunidad importante de mitigación de estos impactos negativos; y VI) están siendo promovidas incluso en países en los que la construcción con madera no es tradicional (Balasbaneh et al., 2019; Kylili et al., 2017; Petrovic et al., 2019; Soust-Verdaguer et al., 2020). A fin de investigar qué tan aplicables son los beneficios reportados anteriormente al caso particular de viviendas temporales e identificar ventajas y desventajas del uso de materiales compuestos, uno de los tres modelos escogidos tiene casi todos sus elementos hechos de madera, mientras que los otros dos la complementan con materiales adicionales.

Los tres modelos escogidos son prefabricados; tienen un área promedio de 18 m²; capacidad para 5 personas; constan de un solo nivel; emplean componentes relativamente ligeros y manipulables para facilitar su armado solo con herramientas manuales; son de rápida instalación; desarmables; resistentes a la intemperie y al clima local; cuentan con ventanas ubicadas en muros opuestos para facilitar la ventilación cruzada natural; y son durables, con una vida útil de 3 años como mínimo. Además, estos modelos de vivienda temporal han sido empleados anteriormente en situaciones de emergencia reales en Perú y en Chile, lo cual valida su aplicación para el escenario planteado en el presente estudio; pese a que los climas de estos países varían entre sí. Se resalta también que el

costo de cada vivienda es similar, de aproximadamente S/11 540 en promedio, según se indica en la **Tabla 10**, que también resume las características más importantes de cada modelo. En el **Anexo A** se realiza una descripción más detallada de cada componente de estas viviendas, junto con imágenes y esquemas.



Tabla 10: Resumen de las principales características de las viviendas analizadas

	Modelo 1 - madera machihembrada	Modelo 2 - paneles <i>superboard</i>	Modelo 3 - paneles SIP
Empresa fabricante	Infabrikaren	Eternit	Tecnopanel
Usada como respuesta ante	Niño costero 2016-2017	Niño costero 2016-2017	Terremoto de Iquique 2014, Incendio Valparaíso 2014
Entidad usuaria	MVCS	MVCS	ONEMI
Características de la vivienda			
Área (m ²)	18.00 (6.00x3.00)	18.85 (7.48x2.52)	17.30 (3.68x4.70)
Cimentación	Poyos de madera tratada (10x18x30 cm)	Poyos de madera tratada (d=12 cm, h=17 cm)	Poyos de madera tratada (d=17,5 cm, h=75 cm)
Piso	Envigado de madera (35x90 mm), cobertura triplay (18 mm)	Envigado de madera (varias dimensiones), cobertura triplay (18 mm)	Envigado de madera (50x75 mm) + paneles SIP (9.5 mm OSB/56 mm EPS/9.5 mm OSB)
Paredes	Paneles con bastidores de madera (45x45 mm), cobertura de listones de madera machihembrada (90x10 mm)	Paneles con bastidores de madera (40x40 mm), cobertura de plancha <i>superboard</i> (6 mm)	Marcos de madera (41x54 mm) y paneles SIP (9.5 mm OSB/56 mm EPS/11.1 mm OSB)
Techo	Planchas de acero (e=0.35 mm) apoyadas sobre viga longitudinal de madera (75x40 mm)	Planchas de fibrocemento (e=5 mm) apoyadas sobre vigas longitudinales de madera (40x70 mm)	Cobertura de planchas de acero (e=0.35 mm) sobre paneles SIP (9.5 mm OSB/56 mm EPS/9.5 mm OSB) apoyados sobre viga transversal de madera (138x41 mm)
Número de ambientes	3	3	2
Peso total estimado (kg)	1,300 (62.4%)	1,782 (85.5%)	2,084 (100.0%)
Costo aprox. por módulo (S/)	12,023.00 (100.0%)	10,502.00 (87.3%)	11,415.00 (94.9%)
Información disponible del proyecto			
Documentos del proyecto	Especificaciones técnicas (Infabrikaren SAC, 2017a) Manual de instalación (Infabrikaren SAC, 2017b) Planos (Infabrikaren SAC, 2017c)	Manual de instalación Moduplak (Eternit SA, 2017)	Especificaciones técnicas (Tecnopanel SA, 2014a) Planos (Tecnopanel SA, 2014b)
Fuentes auxiliares	Exposición Reconstrucción con Cambios (MVCS, 2017)	Exposición Reconstrucción con Cambios (MVCS, 2017)	Manual de instalación paneles SIP (Termocret LTDA, 2011) Guía nacional para la vivienda de emergencia (MOPCH, 2014) Caso de estudio sobre soluciones aplicadas para VTE (Chamblas, 2015)

Fuente: Adaptado de Chamblas, 2015; MOPCH, 2014; Eternit SA, 2017; Infabrikaren SAC, 2017b, 2017c, 2017a; MVCS, 2017; Tecnopanel SA, 2014b, 2014a; Termocret LTDA., 2011

4.3. ACV de las viviendas seleccionadas

4.3.1. Definición de objetivos y alcance

El objetivo principal de este ACV es comparar el impacto ambiental de los tres modelos de vivienda temporal seleccionados, identificando qué materiales, etapas y procesos son los más significativos. Este estudio fue realizado para tener información de referencia en el aspecto medioambiental de las viviendas temporales para emergencias, que se espera que sea útil para incorporar criterios ambientales a la toma de decisiones en estas situaciones. Asimismo, se busca expandir el uso del ACV aplicado a edificaciones, en esta oportunidad al caso particular de viviendas temporales. El público objetivo son los diferentes involucrados e interesados en el diseño ecoamigable de edificaciones, en el uso de viviendas temporales y en la aplicación del ACV a productos complejos, como las edificaciones.

Se estudiaron tres sistemas distintos, cada uno corresponde al ciclo de vida completo de una de las viviendas de emergencia descritas en la sección anterior y en el **Anexo A** (Modelo 1 – madera machihembrada, Modelo 2 – paneles *superboard*, Modelo 3 – paneles SIP). Estos fueron comparados entre sí, por lo que se buscó que el alcance sea el mismo para los tres casos. La función que cumple cada sistema es la misma, proveer refugio para cinco personas bajo condiciones de confort adecuadas para el clima de Lima, incluyendo servicios higiénicos. La UF escogida es 1 m² de área habitable de la vivienda, durante todo su periodo de ocupación. Esta elección es útil para comparar los resultados de cada vivienda entre sí, ya que los tres modelos tienen áreas muy similares, y también para compararlos con otros estudios de diferentes tipos de edificación.

La información primaria ha sido obtenida de la documentación existente de cada uno de los modelos y de la investigación del contexto de la situación hipotética planteada. La información secundaria se obtuvo de la base de datos Ecoinvent 3.6 a través del software SimaPro 9.1. Para los

materiales y el transporte se ha trabajado con procesos correspondientes a las condiciones promedio a nivel global, con las excepciones de la producción del cemento portland usado para las planchas de *superboard*, usadas principalmente en el modelo 2, y el agua y la energía eléctrica operacionales de los tres modelos, que fueron modelados con procesos ajustados al caso específico peruano, dado que se cuenta con dicha información dentro de la base de datos.

Los límites del sistema definidos incluyen todos los procesos que forman parte del ciclo de vida de cada vivienda, a excepción de aquellos correspondientes a las subetapas de aplicación (B1), reemplazo (B4), remodelación (B5), deconstrucción (C1), tratamiento de residuos (C3) y disposición final (C4). Estas elecciones son justificadas en la sección siguiente, en la cual también se explica que para los modelos 1 y 2 se incluye el aporte correspondiente a un baño exterior compartido; sin embargo, en ninguno de los 3 modelos se consideraron redes externas de agua y desagüe. Asimismo, quedan fuera del alcance los procesos relacionados al acondicionamiento general del terreno del albergue en campamento, como podrían ser la remoción de escombros y nivelación. Tampoco se consideran remodelaciones importantes en la vivienda temporal durante su tiempo de uso. La **Figura 29** muestra los LS considerados para el estudio.

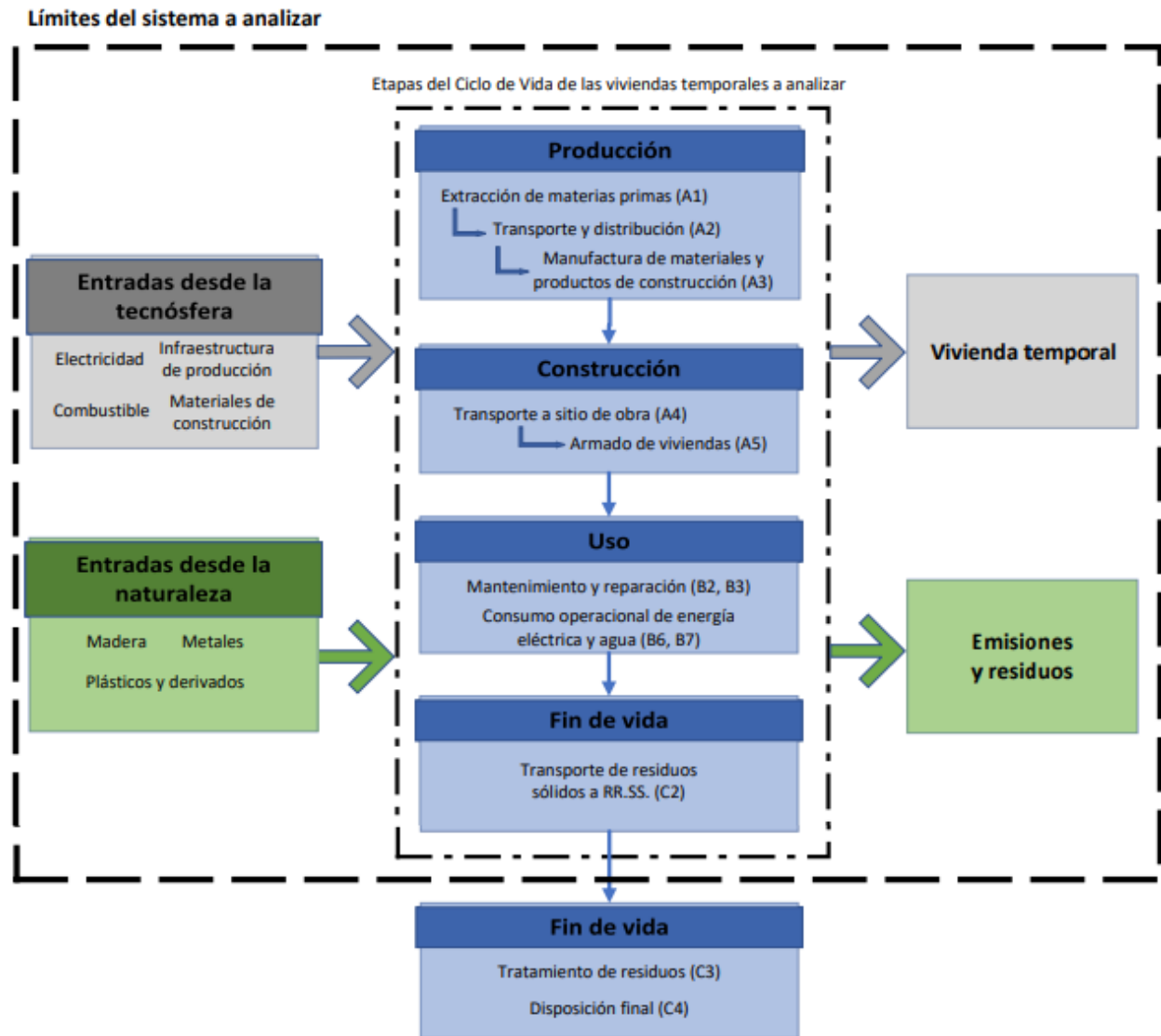


Figura 29: Límites escogidos para el sistema estudiado

Se empleó el modelado atribucional, pues como se mencionó en la sección 3.2.1, este es recomendado para las comparaciones de productos. Asimismo, para poder rastrear el origen de los impactos de cada proceso, se utilizó la versión *Unit Process* de la base de datos; en otras palabras, se trabajó dentro de SimaPro con la biblioteca Ecoinvent 3.6 – APOS – *Unit Processes*.

Asimismo, se consideraron 7 escenarios alternativos adicionales a un escenario base para evaluar la influencia de diferentes tiempos de ocupación y patrones de consumo de los usuarios de las

viviendas. Este procedimiento afectó principalmente a la etapa de uso (B1-7) y es detallado en la sección 4.3.2.3.

4.3.2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

En los párrafos siguientes se explican las consideraciones tomadas y las suposiciones hechas durante la elaboración del inventario, según cada etapa del ciclo de vida de las viviendas a analizar. Asimismo, se indican con mayor detalle los procesos incluidos y excluidos y las limitaciones encontradas. Se reitera que el modelado del inventario considera todas las cantidades relativas a la unidad funcional escogida, 1 m² de área habitable de las viviendas.

4.3.2.1. Etapa de producción

Las cantidades y características de los materiales considerados para cada modelo fueron obtenidas de sus respectivos planos, manuales y especificaciones técnicas. Al ser productos prefabricados, con componentes listos para armar en campo, muchos de estos fueron descompuestos según sus materiales constituyentes básicos para poder ser modelados en SimaPro. Por ejemplo, para el modelo 3, su documentación indica las medidas y cantidades de los paneles SIP a usar. Estos fueron modelados como planchas de EPS, planchas de OSB y pegamento, según cantidades calculadas como parte de este trabajo. Para ello, se empleó también información complementaria sobre distintos componentes, que fue obtenida de la documentación técnica de diversos productos de construcción estándar.

Cuando estos componentes básicos corresponden a productos específicos terminados, como las planchas de OSB, todos los procesos de suministro de materias primas y manufactura están incluidos por defecto dentro de su inventario de Ecoinvent. Por otra parte, productos más genéricos tales como clavos, tornillos o planchas de acero, no cuentan con un inventario específico dentro de

Ecoinvent. Por ello, en dicho caso se empleó el inventario existente para la manufactura promedio de productos de acero, junto con la producción de acero con un peso equivalente a las cantidades calculadas de cada material. Fue posible hacer lo mismo con el resto de materiales sin inventario específico, como el PVC para las tuberías de instalaciones sanitarias y eléctricas y su correspondiente proceso de extrusión; no obstante, el único material ampliamente utilizado del que no se encontró información adecuada para su proceso de manufactura fueron las planchas de *superboard*. Esto constituye una de las limitaciones del estudio y afecta principalmente al modelo 2.

Asimismo, la información referente a toda la cadena de suministro y producción de cada material básico (p. ej. cemento, EPS, etc.) está contenida en sus respectivos procesos unitarios de la base de datos Ecoinvent, considerando valores promedio globales. Dado que en cada uno de estos procesos unitarios se incluyen los impactos de los bienes capitales, como fábricas y demás infraestructura productiva, se puede catalogar al presente análisis como de tercer orden. Asimismo, en Ecoinvent existen procesos *market*, que incluyen además el transporte relacionado a la distribución de los productos básicos terminados. Por ejemplo, para modelar el uso de cemento dentro de la planta de prefabricación del modelo 2, un proceso *market* de cemento incluiría, además de todos los impactos asociados a la producción de este cemento, un valor promedio para el transporte desde una planta cementera hasta la planta de prefabricación de la vivienda. Este valor promedio de transporte corresponde a un contexto global, con contadas excepciones en las que sí se cuenta con un promedio ajustado a la realidad peruana. Entonces, al modelar las cantidades de los materiales básicos usando procesos *market*, ya se están considerando los impactos asociados a las subetapas de suministro de materias primas (A1), transporte (A2) y manufactura (A3).

Como casos especiales, se han identificado también los productos fabricados dentro de las mismas plantas de plantas de prefabricación, los cuales no requieren usar procesos *market*. Además, considerando que el modelo 1 está compuesto mayoritariamente por listones y vigas de madera y que esta proviene principalmente de Pucallpa, se ha verificado que el valor promedio de transporte incluido dentro de la base de datos para la madera se aproxima bastante al calculado para la distancia Lima-Pucallpa, por lo que se ha optado por usar los valores de la base de datos.

Otra consideración importante para los modelos 1 y 2 es que estos no cuentan con un baño incorporado, a diferencia el modelo 3. Por ello, para que todos los modelos cumplan con la función de proveer refugio incluyendo servicios higiénicos, como se estableció en el alcance, se consideró que los ocupantes de los modelos 1 y 2 usan un baño común externo compartido con otros damnificados del mismo albergue en campamento. Para calcular cuántas familias comparten un mismo módulo de baños se promediaron las cantidades totales de módulos de vivienda y de baños repartidas por el MVCS al inicio de la emergencia por el Niño Costero de 2017 (MVCS, 2017). Dado que cada baño es compartido por aproximadamente 15 familias y que cada una de estas ocupa una vivienda temporal, a cada vivienda le correspondería el 6,63% de los impactos asociados al módulo de baño. Las características y equipamiento del baño fueron obtenidas de la misma fuente. En síntesis, se usan los mismos materiales que el modelo 2 pero con un área de 15,65 m². Se han modelado los aparatos sanitarios indicados y las redes internas de tuberías para agua y desagüe; sin embargo, se han excluido elementos externos como el tanque de agua, el biodigestor, el pozo de percolación y las cajas de registro, pues estos forman parte de la red exterior de agua y desagüe, por lo que quedan fuera del alcance del estudio.

Una de las limitaciones más importantes de esta etapa fue la información incompleta sobre algunos productos específicos, tales como la pintura ignífuga y el recubrimiento contra pudrición para

madera. En estos casos se ha optado por escoger el material más parecido posible que ya se encuentre en la base de datos Ecoinvent 3.6. De manera similar, algunos elementos de los modelos 2 y 3 no fueron minuciosamente descritos, a diferencia de sus equivalentes en el modelo 1. Por ejemplo, el modelo 2 no especifica el espesor de los vidrios de las ventanas y no detalla los contenidos exactos de su kit eléctrico, por lo que se han adoptado los mismos valores que en el modelo 1. Si se toma en cuenta que el modelo 2 tiene casi la misma área y ambientes que el modelo 1, esta suposición resulta razonable, por lo que no se espera que estas ligeras imprecisiones afecten significativamente los resultados del estudio.

Con respecto a los pesos totales de cada modelo, los cuales fueron indicados en la **Tabla 10**, se aclara que estos valores incluyen la fracción correspondiente al módulo externo de baño para los modelos 1 y 2. El modelo 2 es más pesado que el modelo 1 principalmente por las planchas de superboard y el techo de fibrocemento. Por su parte, el modelo 3 es incluso más pesado que los otros dos debido al uso intensivo de tableros OSB como parte de los paneles SIP de pisos, muros y techo.

4.3.2.2. Etapa de construcción

Para la subetapa de transporte a sitio de construcción (A4) se consideró el traslado de los módulos empaquetados desde las plantas de prefabricación hasta los lugares donde serán usadas las viviendas. Para ello, se usaron las direcciones de las plantas de prefabricación de las empresas que producen los modelos 1 y 2, ubicadas en los distritos de Villa el Salvador y Lima, respectivamente. Dado que el modelo 3 es producido en Chile, para este estudio se optó por suponer que su fábrica se encuentra en el distrito de Villa el Salvador, pues ahí se concentran varias de las empresas limeñas del mismo rubro. Conocidas las ubicaciones de las fábricas, se calculan las distancias hacia las dos áreas para albergues en campamento definidas en la sección 4.1.3, considerando una

distribución de 50% del total de viviendas para cada una. Para esta subetapa se considera también el uso de plástico de embalaje (*stretch film*) para cada modelo.

Para la subetapa de instalación en obra (A5), dado que todos los modelos indican que el montaje es manual, no se ha considerado ningún tipo de maquinaria de construcción. El acondicionamiento del terreno para cada campamento, que puede incluir su nivelación con maquinaria pesada, está fuera de los límites del sistema definidos en la sección anterior. Asimismo, la mano de obra necesaria para el armado de las viviendas es mínima, los modelos 1 y 2 pueden armarse en un día y el modelo 3, en tres. Por ello, se ha optado por no incluir la mano de obra y, en cambio, modelar las herramientas manuales, que efectivamente son incluidas en los paquetes entregados a los usuarios de las viviendas.

4.3.2.3. Etapa de uso

Dada la alta incertidumbre para el tiempo de ocupación de las viviendas por parte de los damnificados antes de que estos se trasladen a sus nuevas viviendas permanentes, se optó por definir escenarios alternativos según cuatro valores posibles para este parámetro. La investigación de INDECI & PNUD (2011) indica que los albergues están diseñados para ser usados por periodos cortos de tiempo y que pueden ser necesarios por unos pocos meses, pero que eventos pasados como el terremoto de Pisco de 2007 y el de Haití de 2010 han demostrado que pueden ser requeridos durante años (INDECI & PNUD, 2011). Asimismo, autores de casos de estudio similares a los de esta tesis, tales como Seike et al. (2019), quienes también abordaron el problema del tiempo de ocupación indefinido mediante escenarios, consideran periodos de entre 2 a 7 años, mientras que Atmaca & Atmaca (2016) indican un intervalo de 6 meses a 5 años. Por ello, los tiempos de vida a analizar escogidos corresponden a periodos de 6, 12, 24 y 60 meses de uso,

definiendo como el caso base al escenario de 24 meses, por ser considerado el más probable, e incluyendo el de 60 para evaluar el caso de reconstrucción más desfavorable.

Para la subetapa de mantenimiento (B2) se toman en cuenta las recomendaciones contenidas en los manuales de instalación y en la literatura revisada. Como resultado, se optó por modelar el repintado de muros exteriores, la aplicación de una capa adicional de impermeabilizante para los apoyos de madera de la cimentación cada dos años. Para el modelo 3, se incluye el repintado de la puerta interior del baño con la misma frecuencia.

Para la subetapa de reparación (B3), dado que el modelo 1 tiene una vida útil de tres años, es decir, menor que el tiempo de uso a considerar, se ha estimado que se dañará el material equivalente a uno de sus paneles de muro y que, bajo un enfoque también adoptado por Seike et al. (2019), este será completamente reemplazado. Los modelos 2 y 3 no necesitan ser reparados pues su vida útil es igual o mayor que el caso de uso más desfavorable, es decir, cinco años.

Las subetapas de reemplazo (B4) y remodelación (B5) no son aplicables al caso de análisis, pues se asume que no habrá ninguna remodelación importante mientras se usen las viviendas en los albergues en campamento. Las modificaciones menores que pudieran realizar los usuarios, como instalar cortinas, puertas internas u alguna otra división ligera interna no fueron incluidas dentro del alcance del estudio.

Para las subetapas de uso de energía y agua operacionales (B6-7), en casos de estudio similares se afirma que los ocupantes de las viviendas juegan un rol determinante en términos de uso de energía operacional (Atmaca & Atmaca, 2016). Por ello, dado que los patrones de consumo exactos de los usuarios son difíciles de estimar con precisión y, además, pueden variar con el tiempo, se ha optado por realizar el modelado considerando dos enfoques alternativos. El primero de estos fue nombrado

“consumo conservador” y se limita a lo mínimo indispensable para cubrir necesidades de iluminación, aseo personal y disposición de desechos, mientras que el segundo se designó como “consumo estándar” y considera adicionalmente agua para lavar ropa, cocinar, beber y energía para un hervidor eléctrico y una TV 14”. Los datos sobre consumo energético de electrodomésticos y dotación de agua para cada actividad fueron obtenidos de guías publicadas por el Ministerio de Energía y Minas y la Organización Mundial de la Salud, respectivamente (MINEM, 2017; OMS & OPS, 2009). Las demandas operacionales totales para las viviendas fueron calculadas considerando 5 habitantes por módulo y se muestran en la **Tabla 11**. Asimismo, en la **Tabla 12** se detalla la composición de la matriz energética peruana usada para los cálculos en SimaPro, que corresponde al año 2016.

Tabla 11: Demandas operacionales de agua y energía eléctrica según patrón de consumo

Patrón de consumo operacional de los ocupantes	Agua potable (l/mes)	Energía eléctrica (kWh/mes)
Consumo Conservador (CC)	3,000	18.02
Consumo Estándar (CE)	7,500	49.86

Tabla 12: Matriz energética peruana para el 2016

Fuente	Porcentaje (%)
Carbón	1.22
Hidroenergía	49.17
Gas natural, ciclo combinado	38.21
Gas natural, convencional	6.37
Petróleo	1.99
Eólica	2.21
Importación	0.05
Biomasa	0.77
Total	100.00

Fuente: Adaptado de PRé, 2020b

En la Tabla 13 se muestran los nombres dados al escenario base, considerado como el más probable, y a los siete escenarios alternativos planteados que resultan de las diferentes combinaciones entre los cuatro periodos de ocupación y los dos patrones de consumo previamente mencionados. Estos escenarios serán estudiados como parte del análisis de sensibilidad de la sección 5.2.

Tabla 13: Escenarios alternativos evaluados

Patrón de consumo operacional de los ocupantes	Periodo de ocupación (meses)			
	6	12	24	60
Consumo Conservador (CC)	CC6m	CC1a	CC2a	CC5a
Consumo Estándar (CE)	CE6m	CE1a	Esc. Base	CE5a

4.3.2.4. *Etapa de fin de vida*

Dado que los tres modelos pueden ser desarmados en tiempos similares a los de armado y usando incluso menos herramientas manuales, se tiene que la subetapa de deconstrucción (C1), si bien es aplicable, tendrá un impacto despreciable, por lo que no fue modelada.

Por otro lado, para la subetapa de transporte de residuos (C2), pese a que las viviendas pueden ser desarmadas y vueltas a armar en otra ubicación para ser usadas como ambiente auxiliar de otra vivienda definitiva, similarmente a como sus componentes pueden ser reutilizados o reciclados, existe un alto grado de incertidumbre al respecto. Por ello, se asumió que todos los materiales restantes son desechados y trasladados a diferentes rellenos sanitarios (RR.SS.) de la ciudad, cuyas ubicaciones son conocidas. Entonces, se calculó la distancia entre cada uno de los dos albergues en campamento y los cuatro RR.SS. considerados, asumiendo que cada uno de estos recibe la misma cantidad de desechos.

Las subetapas de tratamiento de residuos (C3) y disposición (C4) quedan fuera del alcance del proyecto. Asimismo, como se explicó en el párrafo anterior, se asume que todos los materiales son desechados y no hay reciclaje ni reúso. Estas suposiciones se adoptan teniendo en cuenta investigaciones similares como las de Li & Froese (2016) y Monteiro et al. (2021), en las que se optó por no modelar estas subetapas debido a la alta incertidumbre que implica la dificultad de su pronóstico y desconocimiento de las tasas de reciclaje, adicionalmente al hecho de que se suele esperar que la etapa de fin de vida aporte mínimamente a los impactos del ciclo de vida (Li & Froese, 2016; Monteiro et al., 2021).

4.3.2.5. Inventario de Ciclo de Vida de las viviendas analizadas

Habiendo tenido en cuenta todas las consideraciones señaladas, la **Tablas 14-16** muestran el ICV de los tres modelos bajo análisis, con cantidades por unidad de vivienda y por UF, es decir, por m² de área habitable. La **Tabla 14** agrupa los materiales y procesos de las etapas de producción, construcción y fin de vida, pues estos son los mismos para todos los escenarios estudiados, mientras que la **Tabla 15** se enfoca en la etapa de uso, cuyo inventario varía para cada escenario considerado. Por último, la **Tabla 16** complementa las anteriores detallando los inventarios auxiliares usados para el modelado en SimaPro de las tres viviendas.

Tabla 14: Inventario de Ciclo de Vida de los tres modelos de vivienda analizados (etapas de producción, construcción y fin de vida)

Material/proceso	Material/proceso de EcoInvent para modelado	Unidad	Modelo 1 – madera machihembrada (18.00 m ²)		Modelo 2 – paneles superboard (18.85 m ²)		Modelo 3 – paneles SIP OSB (17.30 m ²)	
			Cantidad por módulo	Cantidad por UF	Cantidad por módulo	Cantidad por UF	Cantidad por módulo	Cantidad por UF
Producción								
Acero para cobertura techo, clavos, tornillos, etc.	Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U	kg	116.89	6.49	23.07	1.22	89.34	5.18
Aluminio para cobertura techo	Aluminium, primary, liquid {GLO} market for APOS, U	kg	2.69	0.15	-	-	1.51	0.09
Carbonileo de petróleo	Mastic asphalt {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	2.50	0.15
Extrusión de tuberías de PVC	Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	7.42	0.43
Kit accesorios	(Ver tabla 16)	u	1.00	0.06	1.00	0.05	1.00	0.06
Kit eléctrico	(Ver tabla 16)	u	1.00	0.06	1.00	0.05	1.00	0.06
Llave para ducha	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	0.20	0.01
Loza vitrificada	Sanitary ceramics {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	38.80	2.25
Madera en bloque	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RoW} market for APOS, U	m3	0.10	0.01	0.06	0.003	0.37	0.02
Madera en listones	Sawnwood, lath, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	1.19	0.07	0.55	0.03	0.38	0.02
Madera en tablero	Sawnwood, board, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	-	-	0.01	0.0003	-	-
Madera para vigas	Sawnwood, beam, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.20	0.01	0.47	0.03	0.20	0.01
Malla mosquitero	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U	kg	0.72	0.04	0.43	0.02	0.35	0.02
Manual de instrucciones	Printed paper {GLO} market for APOS, U	kg	0.08	0.005	0.08	0.004	0.08	0.005
Marco de aluminio para ventanas	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {GLO} market for APOS, U	m2	-	-	0.45	0.02	0.42	0.02
Módulo externo de baño compartido	(Ver tabla 16)	u	0.07	0.004	0.07	0.004	-	-
Papel fieltro	Kraft paper, unbleached {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	3.93	0.23
Pintura impermeabilizante	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	15.00	0.87
Pintura para cobertura del techo, pintura ignifuga	Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state {RoW} market for alkyd paint, white, without water, in 60% solution state APOS, U	kg	24.56	1.36	-	-	-	-
Pintura para exteriores	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state APOS, U	kg	18.40	1.02	7.08	0.38	12.74	0.74
Plancha de fibrocemento para cobertura de techo	Fibre cement corrugated slab {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	315.20	16.72	-	-
Planchas de EPS	Polystyrene foam slab {RoW} production APOS, U	kg	-	-	-	-	63.42	3.68
Planchas de OSB	Oriented strand board {RoW} production APOS, U	m3	-	-	-	-	1.71	0.10
Planchas de superboard	(Ver tabla 16)	kg	-	-	0.47	0.03	-	-
Planchas de triplay	Plywood, for indoor use {RoW} market for APOS, U	m3	0.32	0.02	0.32	0.02	-	-
Preservante de madera	Wood preservative, creosote {GLO} market for APOS, U	kg	0.36	0.02	0.43	0.02	1.36	0.08
Puertas de madera	Door, inner, wood {GLO} market for APOS, U	m2	-	-	1.89	0.10	2.93	0.17
Trabajo en metal promedio para manufactura de productos de acero	Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	kg	116.89	6.49	23.07	1.22	88.21	5.11
Tuberías de PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for APOS, U	kg	-	-	-	-	7.42	0.43
Vidrio crudo	Flat glass, coated {RoW} market for flat glass, coated APOS, U	kg	19.48	1.08	12.15	0.64	11.88	0.69
Zinc para cobertura techo	Zinc {GLO} market for APOS, U	kg	2.14	0.12	-	-	1.39	0.08
Construcción								
Embalaje plástico	Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for APOS, U	kg	2.58	0.14	1.84	0.10	2.58	0.15
Kit de herramientas manuales	(Ver tabla 16)	u	1.07	0.06	1.07	0.06	1.00	0.06
Transporte de viviendas desde fábrica hasta campamentos	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	t.km	49.46	2.75	59.59	3.16	79.29	4.60
Uso (Ver tabla 15)								
Fin de vida								
Transporte de residuos desde campamentos hasta RRSS	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	t.km	59.61	3.31	81.70	4.33	95.57	5.07

Tabla 15: Inventario de Ciclo de Vida de los tres modelos de vivienda analizados (etapa de uso: escenarios base y alternativos)

Material/proceso	Material/proceso de EcoInvent para modelado	Unidad	Modelo 1 – madera machihembrada (18.00 m ²)		Modelo 2 – paneles superboard (18.85 m ²)		Modelo 3 – paneles SIP OSB (17.30 m ²)		
			Cantidad por módulo	Cantidad por UF	Cantidad por módulo	Cantidad por UF	Cantidad por módulo	Cantidad por UF	
Etapas de uso									
Escenario base									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	180,000	10,000	180,000	9,549	180,000	10,435	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	1,197	66	1,197	63	1,197	69	
Escenario CC6m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	18,000	1,000	18,000	955	18,000	1,044	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	108	6	108	6	108	6	
Escenario CC12m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	36,000	2,000	36,000	1,910	36,000	2,087	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	216	12	216	11	216	13	
Escenario CC24m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	72,000	4,000	72,000	3,820	72,000	4,174	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	432	24	432	23	432	25	
Escenario CC60m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	180,000	10,000	180,000	9,549	180,000	10,435	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	1,081	60	1,081	57	1,081	63	
Reemplazo de piezas dañadas (paneles de muros)	Sawnwood, lath, hardwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.07	0.004	-	-	-	-	
Repintado de muros exteriores	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state APOS, U	kg	13.57	0.75	12.36	0.66	9.26	0.54	
Reaplicación de preservante para madera	Wood preservative, creosote {GLO} market for APOS, U	kg	0.73	0.04	0.87	0.05	1.36	0.08	
Escenario CE6m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	45,000	2,500	45,000	2,387	45,000	2,609	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	299	17	299	16	299	17	
Escenario CE12m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	90,000	5,000	90,000	4,775	90,000	5,218	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	598	33	598	32	598	35	
Escenario CE60m									
Agua potable	Tap water {PE} market for tap water APOS, U	kg	450,000	25,000	450,000	23,873	450,000	26,088	
Energía eléctrica	Electricity, low voltage {PE} market for APOS, U	kWh	2,992	166	2,992	159	2,992	173	
Reemplazo de piezas dañadas (paneles de muros)	Sawnwood, lath, hardwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.07	0.004	-	-	-	-	
Repintado de muros exteriores	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state APOS, U	kg	13.57	0.75	12.36	0.66	9.26	0.54	
Reaplicación de preservante para madera	Wood preservative, creosote {GLO} market for APOS, U	kg	0.73	0.04	0.87	0.05	1.36	0.08	

Tabla 16: Inventarios auxiliares para los modelos de vivienda analizados

Inventarios auxiliares creados	Material/proceso de EcoInvent para modelado	Unidad	Cantidad
Kit accesorios		u	1.00
Cerraduras y bisagras	Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U	kg	1.12
Kit de herramientas manuales		u	1.00
Escalera tijera 3m	Sawnwood, beam, hardwood, dried (u=20%), planed {RoW} planing, beam, hardwood, u=20% APOS, U	m3	0.12
Martillo, desarmador, wincha, juego de llaves	Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U	kg	0.95
Pabilo	Fibre, cotton {GLO} market for fibre, cotton APOS, U	kg	0.03
Sellador elástico	Polyurethane, flexible foam {RoW} market for polyurethane, flexible foam APOS, U	kg	0.39
Wincha	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, U	kg	0.10
Kit eléctrico		u	1.00
Cables conductores	Cable, unspecified {GLO} market for APOS, U	kg	1.31
Cajas de pase sin conos	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, U	kg	0.20
Canaletas, cajas de pase, tablero de distribución, tapas ciegas, interruptor termomagnético (ITM)	Polyvinylidenechloride, granulate {RoW} market for polyvinylidenechloride, granulate APOS, U	kg	2.57
ITM	Copper {GLO} market for APOS, U	kg	0.21
ITM y tornillos	Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U	kg	0.21
Luminaria fluorescente	Compact fluorescent bulb {GLO} market for compact fluorescent lamp APOS, U	u	3.00
Tomacorrientes	Polyurethane, rigid foam {RoW} market for polyurethane, rigid foam APOS, U	kg	0.42
Módulo externo de baño compartido		u	1.00
Acero para cobertura techo, clavos, tornillos, etc.	Steel, unalloyed {GLO} market for APOS, U	kg	20.32
Extrusión de tuberías de PVC	Extrusion, plastic pipes {GLO} market for APOS, U	kg	31.41
Kit accesorios		u	1.00
Kit eléctrico baño		u	1.00
Llave para ducha	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, U	kg	0.40
Loza vitrificada	Sanitary ceramics {GLO} market for APOS, U	kg	99.00
Madera en bloque	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RoW} market for APOS, U	m3	0.07
Madera en listones	Sawnwood, lath, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.53
Madera en tablero	Sawnwood, board, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.01
Madera para vigas	Sawnwood, beam, softwood, dried (u=20%), planed {GLO} market for APOS, U	m3	0.52
Malla mosquitero	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U	kg	0.31
Marco de aluminio para ventanas	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {GLO} market for APOS, U	m2	1.20
Pintura impermeabilizante	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {GLO} market for APOS, U	kg	16.64
Pintura para exteriores	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state APOS, U	kg	7.08
Plancha de fibrocemento para cobertura de techo	Fibre cement corrugated slab {GLO} market for APOS, U	kg	270.28
Planchas de superbord	Plancha superbord	kg	613.01
Planchas de triplay	Plywood, for indoor use {RoW} market for APOS, U	m3	0.28
Preservante de madera	Wood preservative, creosote {GLO} market for APOS, U	kg	0.49
Puertas de madera	Door, inner, wood {GLO} market for APOS, U	m2	1.89
Trabajo en metal promedio para manufactura de productos de acero	Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	kg	19.35
Tuberías de PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for APOS, U	kg	31.41
Vidrio crudo	Flat glass, coated {RoW} market for flat glass, coated APOS, U	kg	10.80
Planchas de superbord		kg	1.00
Cemento Portland	Cement, Portland {PE} market for cement, Portland APOS, U	kg	0.30
Sílice	Silica sand {GLO} market for APOS, U	kg	0.62
Fibra celulosa	Cellulose fibre, inclusive blowing in {GLO} market for APOS, U	kg	0.09

4.3.3. Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

Para la selección de categorías de impacto a analizar se ha tomado en cuenta la revisión de la literatura en cuanto a ACV aplicado a edificaciones residenciales. Se resalta que la categoría de cambio climático ha sido incluida en todos los ACV revisados. Asimismo, son bastante comunes las categorías de agotamiento del ozono estratosférico, acidificación terrestre, eutrofización acuática, escasez de recursos minerales y escasez de recursos fósiles. La categoría de toxicidad

humana también es considerada con frecuencia en estudios similares; sin embargo, en este caso fue excluida, siguiendo las recomendaciones del trabajo realizado por Soust-Verdaguer et al. (2016). Las categorías de formación de material particulado y formación de oxidantes fotoquímicos (ozono troposférico) son ocasionalmente incluidas en las investigaciones revisadas; no obstante, se optó por incluirlas debido a que Lima Metropolitana ha sido definida como una zona de atención prioritaria en materia gestión de la calidad del aire desde el año 2001 y que los valores medidos de material particulado durante los últimos años exceden los máximos permitidos en las normas vigentes (MINAM, 2019). Las categorías escogidas se muestran a continuación en la **Tabla 17**.

Tabla 17: Categorías de impacto seleccionadas para este estudio

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Abreviatura	Unidad
Cambio climático	Potencial de calentamiento global	PCG	kg CO ₂ eq
Agotamiento del ozono estratosférico	Potencial de agotamiento de ozono	PAO	kg CFC-11 eq
Formación de ozono, salud humana	Potencial de formación de ozono (salud humana)	PFOh	kg NO _x eq
Formación de material particulado fino	Potencial de formación de material particulado	PFMP	kg PM _{2.5} eq
Acidificación terrestre	Potencial de acidificación terrestre	PAT	kg SO ₂ eq
Eutrofización de agua dulce	Potencial de eutrofización de agua dulce	PEAD	kg P eq
Escasez de recursos minerales	Potencial de mineral excedente	PME	kg Cu eq
Escasez de recursos fósiles	Potencial de combustibles fósiles	PCF	Kg oil eq

Para las fases de clasificación y caracterización se empleó la metodología ReCiPe 2016 midpoint (H) v1.04, la cual está incorporada dentro de SimaPro e incluye a las categorías de impacto seleccionadas dentro de su modelo de caracterización. Asimismo, se eligió la perspectiva jerárquica (H) de ReCiPe 2016 debido a que se alinea con los principios más comunes y tiene un enfoque a mediano plazo, comparada con las otras dos perspectivas.

No se incluyeron las subfases opcionales de normalización y ponderación debido a que I) no son indispensables para los objetivos del presente estudio, II) la literatura revisada omite estos pasos, y III) se simplifica la comparación de resultados con otros estudios considerando categorías de impacto independientes.

Una vez tomadas todas estas decisiones metodológicas, de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio, se realizó el modelado en SimaPro de las tres viviendas y se ejecutaron los análisis para los ocho escenarios considerados. Estos resultados, su interpretación y evaluación mediante análisis de sensibilidad se presentan a continuación en el capítulo 5, mientras que las conclusiones del ACV y de la tesis son abarcadas en el capítulo 6.



5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del análisis de impacto para los tres modelos. En primer lugar, se analiza en detalle el escenario base, evaluando cada etapa del ciclo de vida de las edificaciones y comparando los impactos totales para cada modelo. Posteriormente, se realiza el análisis de sensibilidad de los resultados frente a los cambios determinados por los escenarios alternativos descritos en la sección 4.3.2.3. Para ello, se emplean las contribuciones por materiales obtenidas de SimaPro para explicar los resultados y se comparan estos con los hallazgos de estudios previos similares. Por último, se hace una comparación a nivel de ciclo de vida del potencial de calentamiento global y de la demanda energética operacional con los casos revisados de ACV para viviendas temporales de emergencia y viviendas permanentes.

5.1. Escenario base

La **Figura 30** muestra, para cada categoría de impacto seleccionada, los resultados de la caracterización de los tres modelos comparados, con las contribuciones cada etapa de sus respectivos ciclos de vida. Para cada categoría de impacto, los porcentajes se refieren al impacto total de cada modelo durante su ciclo de vida completo.

Analizando los resultados según las etapas del ciclo de vida de las viviendas, se identifica claramente, para los tres modelos y las ocho categorías, que la etapa de producción es responsable de la mayor parte de los impactos. Los casos de mayor y menor contribución de esta etapa al total del ciclo de vida son el 95,8% del potencial de mineral excedente del modelo 2 y el 66,3% del potencial de combustibles fósiles del modelo 1, mientras que el aporte promedio de la etapa de producción, considerando todas las categorías y modelos, es de 84,7%. En cambio, las contribuciones de las etapas de construcción y fin de vida oscilan entre 0,4-2,7% y 0,1-1,2%,

respectivamente. Es importante tener presente que para la etapa de fin de vida solo se modeló el transporte de residuos sin considerar su procesamiento o disposición final. Por su parte, la etapa de uso es responsable, en promedio, del 13,3% de los impactos totales, mientras que sus valores máximos y mínimos ocurren en las mismas categorías y modelos que la etapa de producción, pero en orden inverso, es decir, el 3,8% del potencial de mineral excedente del modelo 2 y el 30,4% del potencial de combustibles fósiles del modelo 1.

Esta contribución relativa promedio tan elevada de la etapa de producción es un resultado distinto al encontrado por trabajos similares de ACV aplicado a viviendas unifamiliares con madera como material principal. Algunos de esos trabajos son el realizado por Petrovic et al. (2019), que determinó que las etapas de producción y uso representan aproximadamente el 30% y 60%, respectivamente, y el de Soust-Verdaguer et al. (2020), que también atribuye los impactos más altos a la etapa de uso. Esta diferencia puede ser explicada al tener en cuenta que el tiempo de uso de las viviendas temporales es de solo 2 años, frente a los periodos de 100 y 60 años que usaron los autores mencionados, y que, para el clima templado de Lima, las viviendas temporales no necesitan usar sistemas HVAC, por lo que su consumo energético es drásticamente menor que los casos estándar de viviendas unifamiliares. Asimismo, por el hecho de poder ser armadas y desarmadas manualmente, sin necesidad de maquinaria pesada y tener un mantenimiento relativamente sencillo, la etapa de producción cobra mayor importancia relativa.

Similarmente, el aporte de cada etapa del ciclo de vida para los modelos de este estudio contrasta también con otros casos de ACV aplicado a vivienda de emergencia. En el caso del módulo de madera analizado por Seike et al. (2019), para el escenario de 2 años, las etapas de producción y construcción representan el 39,4% del potencial de calentamiento global, mientras que el 57,7% del mismo corresponde a la etapa de uso. La contribución relativa de esta última solo se incrementa

al aumentar el periodo de ocupación de las viviendas, llegando a 77,3% y 82,7% para los escenarios de 5 y 7 años, respectivamente (Seike et al., 2019). Por su parte, en el trabajo de Atmaca & Atmaca (2016) se halló que durante la etapa de uso se consume entre 4,8 y 5 veces más energía que durante las etapas de producción y construcción (Atmaca & Atmaca, 2016). Nuevamente, esta discrepancia tan acentuada puede ser atribuida a que estos dos casos sí incluyen la utilización de sistemas HVAC durante la operación de las viviendas, a diferencia de los modelos analizados en esta tesis.

En cuanto a los impactos de cada modelo, los resultados de cada categoría exhiben tres patrones marcadamente distintos (en adelante, patrones I, II y III). En primer lugar, para las categorías de cambio climático, formación de ozono, formación de material particulado, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce y escasez de recursos fósiles se obtienen resultados similares, los modelos 1 y 2 tienen impactos sustancialmente menores que los del modelo 3, aproximadamente proporcionales a una razón de 3:3:5 (patrón I), pues, en promedio, los impactos de los modelos 1 y 2 para estas 6 categorías equivalen al 57,0% y 56,2% de los impactos del modelo 3. Los casos extremos corresponden al potencial de combustibles fósiles del modelo 2 y al potencial de eutrofización del modelo 1, equivalentes al 47,6% y 64,4% de su análogo en el modelo 3.

Los mayores impactos del modelo 3 para estas seis categorías son atribuibles en gran medida al empleo de paneles SIP, específicamente a los tableros OSB que lo conforman. Por ejemplo, estos tableros son responsables del 32,6% del potencial de formación de ozono y el 24,8% del potencial de acidificación terrestre del modelo 3. Analizando los insumos de la fabricación de los tableros OSB se halló que el componente con mayor contribución es el diisocianato de difenilmetano (MDI), que también es usado para la producción del pegamento a base de poliuretano de los paneles SIP, que une los tableros OSB a las planchas de EPS. El aporte de este compuesto a los impactos totales es significativo para estas seis categorías. Prueba de ello es que MDI usado en tableros OSB

y pegamento contribuye con el 18,0% del potencial de formación de material particulado del modelo 3.

En el caso del modelo 1, el acero, que es principalmente usado para la cobertura del techo de la vivienda, es el contribuyente mayoritario en las categorías de cambio climático, formación de material particulado, acidificación terrestre y eutrofización de agua dulce, con impactos que oscilan entre 21,0-32,6%. Para el potencial de formación de ozono, los mayores aportes pertenecen a los listones de madera de los muros y los tableros de *triplay* del piso, con 16,4% y 16,5%, respectivamente, mientras que la energía eléctrica operacional causa el 24,9% del potencial de combustibles fósiles.

Para el modelo 2, los impactos de las seis categorías en cuestión están repartidos más equitativamente entre diversos elementos tales como el marco de aluminio para las ventanas, con 22% del potencial de acidificación terrestre; la cobertura de fibrocemento del techo, con 14,2% del potencial de eutrofización; los tableros de *triplay* del piso, con 16,9% del potencial de formación de material particulado; y la energía eléctrica operacional, con 24,5% del potencial de combustibles fósiles. Se resalta que, a diferencia de los otros dos modelos, no existe un solo proceso cuya contribución sea por sí misma tan significativa, pues en general cada categoría tiene dos o tres elementos cuyos resultados son del mismo orden de magnitud. Asimismo, es importante destacar que, pese a que la etapa de producción es la más significativa del ciclo de vida, los impactos de la energía eléctrica consumida durante la etapa de operación son ocasionalmente comparables con los impactos individuales de cada uno de los materiales principales, como sucede para el cambio climático y la formación de ozono.

Estos resultados son consistentes con trabajos como el de Li & Froese (2016). Dichos autores concluyeron que, generalmente, las edificaciones que emplean paneles SIP, en comparación con las que utilizan marcos de madera, tienen mayores impactos en las categorías de calentamiento global, acidificación, eutrofización y agotamiento de recursos fósiles, lo cual corresponde con los resultados del modelo 3 frente a los modelos 1 y 2 del presente estudio. En el caso específico de la acidificación y eutrofización, también se señala a la producción de tableros OSB como uno de los principales contribuyentes al impacto; sin embargo, de los insumos de su proceso de fabricación, se resaltó como responsable a la cera de parafina (Li & Froese, 2016).

Similarmente, en el estudio realizado por Atmaca & Atmaca (2016) se señaló a los tableros OSB como un material significativo debido a su aporte promedio para los dos modelos analizados de 11,8% del total de energía incorporada de los materiales de construcción, pese a que solo fue usado como parte del techo. Asimismo, en otras viviendas temporales similares como la analizada por Seike et al. (2019), dos de los materiales con mayores contribuciones para las etapas de producción, en la categoría de cambio climático, fueron la espuma de poliuretano con 31,2%, usada como parte del aislamiento de muros externos, y los metales no ferrosos con 16,4%, como el aluminio usado en marcos de ventanas, resultado similar al del presente trabajo, en el que ambos productos también generaron aportes significativos en la mayoría de categorías para los modelos 2 y 3.

Por otro lado, el segundo patrón identificado corresponde a la categoría de agotamiento del ozono estratosférico, en la cual los modelos 1 y 2 tienen impactos equivalentes al 21,7% y 20,6%, respectivamente, del resultado del modelo 3, lo que se aproxima bastante a una razón de 1:1:5 (patrón II). Para los modelos 1 y 2, el principal contribuyente al potencial de agotamiento del ozono fue la energía eléctrica de la etapa de operación, con aportes del 17,2% y 17,3% de sus totales respectivos. Otros elementos con impactos importantes fueron el kit eléctrico y los tableros de

triplay, con 17,1% y 13,9% para el modelo 1, y 17,2% y 14,0% para el modelo 2. Cabe resaltar que los impactos del kit eléctrico se deben principalmente al uso de tuberías de PVC. En el caso del modelo 3, los mayores impactos corresponden nuevamente al MDI, responsable del 74,7% del total del potencial de agotamiento, repartido entre la producción de tableros OSB y del pegamento de poliuretano para los paneles SIP.

Investigaciones anteriores como la de Monteiro et al. (2021) atribuyeron la mayor parte del potencial de agotamiento de ozono de su vivienda estudiada a la etapa de uso, específicamente al consumo energético y al uso de refrigerantes; no obstante, para el caso de esta tesis, esta etapa tiene una contribución relativa mucho menor en los 3 modelos, por lo que este no podría ser el factor dominante. Por otro lado, Kylili et al. (2017), al analizar los resultados de esta categoría por cada material, hallaron que las obras de concreto representaban el 89,7% del potencial de agotamiento de ozono total de la vivienda estudiada. Este resultado se contrasta con el de Soust-Verdaguer et al. (2020), que demostró que, para la categoría de agotamiento de ozono, los impactos de dos viviendas de áreas similares, una de concreto, acero y ladrillo de arcilla y otra mayoritariamente de madera, eran bastante cercanos. Con ello concuerda el hecho de que los impactos de los modelos 1 y 2 sean próximos entre sí, pero marcadamente inferiores a los del modelo 3, donde, como se indicó en el párrafo anterior, el empleo de paneles SIP es el elemento crítico para esta categoría.

El tercer y último patrón identificado abarca la categoría de escasez de recursos minerales, que es la única en la que el modelo 3 no tiene el mayor impacto; sin embargo, los tres modelos presentan resultados bastante similares. Los impactos de los modelos 2 y 3 representan el 99,5% y el 96,7% del correspondiente al modelo 1, es decir que estos pueden representarse en razón 1:1:1 (patrón III). Para el modelo 1, los materiales con mayor contribución al potencial de mineral excedente fueron las pinturas con el 26,1% y el zinc con el 25,1%; para el modelo 2, fueron las planchas de

superboard, específicamente la fibra de celulosa que la conforma, con 55,5%; y para el modelo 3, fueron el zinc con 21,8% y el acero con 16,3%. Para entender estos resultados, es importante tener presente que el dióxido de titanio es un compuesto bastante utilizado en la fabricación de pinturas. Similarmente, en el proceso de producción de fibra celulosa intervienen en pequeñas cantidades diversos elementos tales como el zinc; sin embargo, dado que en el modelo 2 el material más usado son las planchas *superboard*, que contienen fibra celulosa, el acumulado de estos aportes termina siendo relativamente significativo.

Considerando los resultados de estudios previos similares, para la categoría de agotamiento de recursos minerales, en el caso de la vivienda pasiva unifamiliar analizada por Kylili et al. (2017), los materiales con más impacto fueron el concreto, las losas cerámicas y el *triplay* con 57,40%, 10,37% y 10,36% del potencial de agotamiento total de la vivienda. Por otro lado, Monteiro et al. (2021) hallaron que, para su caso de estudio, el agotamiento abiótico presentó resultados similares a las categorías de cambio climático, acidificación y eutrofización, lo cual contrasta con los patrones identificados en esta tesis para estas categorías de impacto. Cabe recalcar que la vivienda unifamiliar estudiada por Monteiro et al. (2021) tiene mayor área, mayor tiempo de vida (50 años) y una mayor relevancia de la etapa de uso para el ciclo de vida de la vivienda.

Por último, en términos generales, se observa que el modelo 3 presenta impactos significativamente mayores en 7 de las 8 categorías analizadas, por lo que podría ser señalado como el menos conveniente desde el punto de vista medioambiental. Se resalta que para las 6 categorías del patrón I, la magnitud de los impactos ambientales de los modelos 1 y 3 son aproximadamente proporcionales a los pesos totales de cada vivienda (ver **Tabla 10**); sin embargo, esta afirmación no es válida para ninguna otra pareja de resultados, por lo que se verifica que, para este caso de estudio, ambas magnitudes no son directamente dependientes. En lugar de ello, los impactos

ambientales están más fuertemente influenciados por los aportes de un subconjunto limitado de materiales específicos que varían según la vivienda analizada y que han sido señalados para cada caso en los párrafos anteriores.





■ Producción ■ Construcción ■ Uso ■ Fin de vida

Figura 30: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) por etapas del ciclo de vida, para las ocho categorías de impacto seleccionadas – Escenario base.

5.2. Análisis de sensibilidad

En las **Tablas 18-20** se muestran los resultados del análisis de sensibilidad, según el escenario base y los 7 escenarios alternativos definidos previamente en la sección 4.3.2.3 (ver **Tabla 13**). Se recalca que los escenarios adicionales solo varían el inventario de la etapa de uso, específicamente las cantidades de energía eléctrica y agua potable consumidas, así como los materiales necesarios para el mantenimiento y reparación de la vivienda. Esta información se encuentra detallada en la **Tabla 15**.

En primer lugar, con el fin de evidenciar la magnitud de los cambios que implican los diferentes patrones de consumo operacional (consumo conservador y estándar) y periodos de ocupación considerados, la **Tabla 18** compara el impacto de cada escenario y categoría con su análogo en el escenario base, expresándolo como porcentaje de este.

Por otra parte, para evaluar la estabilidad de los tres patrones observados en los resultados del escenario base (patrones I, II y III), la **Tabla 19** muestra los resultados expresados como porcentaje del modelo con mayor impacto para cada categoría y escenario. Para conseguir este último objetivo de forma analítica, para cada combinación de categoría y escenario se calcularon las desviaciones estándar de los resultados de los tres modelos presentados en la mencionada **Tabla 19**. El cambio relativo entre los resultados de cada modelo para cada escenario a evaluar fue cuantificado mediante el valor absoluto de la diferencia entre las desviaciones estándar de dicho escenario y el escenario base. Esta cantidad se define como la variabilidad de la categoría para cada escenario y sus valores son recopilados en la **Tabla 20**, en la que una cantidad cercana a cero implica que los impactos de los tres modelos cambiaron todos en la misma proporción, conservando los patrones identificados para el escenario base (patrones I, II y III). A fin de visualizar los resultados con

mayor facilidad, todas las tablas de esta sección presentan las categorías de impacto agrupadas según los tres patrones (I, II y III) definidos para el escenario base.

En cuanto a los impactos individuales de cada modelo con respecto al escenario base (ver **Tabla 18**), globalmente los resultados siguen una lógica bastante intuitiva, es decir, los impactos ambientales aumentan siempre que se considere un mayor tiempo de operación y siempre que los usuarios tengan un patrón de consumo energético menos ahorrativo. Por ello, ha sido un resultado esperado el que los casos de mayor reducción e incremento individual correspondan a los escenarios CC6m y CE5a, que representan los casos extremos en cuanto a patrones de consumo y periodos de ocupación. Estos equivalen al 72,4% y 149,0% del impacto del modelo base para la categoría de escasez de recursos fósiles del modelo 1. Otro caso notable es el de la categoría de cambio climático, en la que, para el mismo modelo 1, estos dos escenarios presentan resultados respectivos de 78,1% y 138,9%.

Asimismo, considerando el promedio de las ocho categorías de impacto estudiadas, las variaciones con respecto al escenario base para los tres modelos son menores a 14,5% para el escenario CC6m y a 27,3% para el escenario CE5a. Similarmente, para los escenarios CC1a, CC2a, CC5a, CE6m, CE1a, la categoría con mayor variación respecto al escenario base también es la escasez de recursos fósiles, nuevamente seguida por el cambio climático. El escenario CC5a es un caso especial en el que los efectos del patrón conservador de consumo energético y del mayor tiempo de ocupación se compensaron mutuamente, pues la variación promedio de las ocho categorías fue menor a 0,4%.

Estos resultados concuerdan con la idea de que el consumo eléctrico influye principalmente en las categorías de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que para el resto de categorías, las variaciones son relativamente pequeñas. Cabe resaltar que, para los tres modelos,

el aporte de la energía eléctrica consumida durante la etapa de uso oscila entre 12,7- 24,9% para la escasez de recursos fósiles y entre 11,2- 18,8% para el cambio climático del escenario base.

El grado de sensibilidad de los resultados frente a las variaciones introducidas mediante escenarios alternativos depende fuertemente del alcance definido para el estudio. Para el presente trabajo, la mayor variación porcentual es de 49,0% para la escasez de recursos fósiles del escenario CE5a. Investigaciones similares que también evaluaron distintos escenarios para la misma vivienda fueron las de Monteiro et al. (2021) y Kylili et al. (2017).

En el primer caso, dada la gran influencia del comportamiento de los usuarios en la energía operacional consumida para calefacción y ventilación en zonas templadas mediterráneas, se establecieron tres escenarios, uno estándar y otros dos más modestos, que consideran el 50% y el 25% de la demanda calculada para el primero. Al analizar la categoría de impacto de energía primaria no renovable para la etapa de uso, se halló que esta variaba entre el 14% y el 46% con respecto al total del ciclo de vida, lo que equivale a que la energía total del ciclo de vida varíe 58,6% (Monteiro et al., 2021). El hecho de que las variaciones totales de la investigación mencionada y del presente trabajo sean similares pese a las importantes diferencias entre las viviendas estudiadas, siendo una de las principales el requerimiento de sistemas HVAC para las viviendas de Portugal, puede parecer inicialmente contraintuitivo; sin embargo, se debe considerar que, para el caso de esta tesis, I) para la mayoría de escenarios y categorías de impacto consideradas, las variaciones son relativamente menores, y II) que la diferencia relativa entre los periodos de ocupación para los escenarios base y CE5a, es decir 2 y 5 años, es bastante significativa dentro del contexto de este estudio, ya que el segundo caso representa el 250% de la duración del primero.

Para el caso de Kylili et al. (2017), se determinó que el ratio entre la energía primaria de las etapas de uso y preuso oscila entre 31,6-8,3% según varíe entre 2 y 20 cm el grosor del aislamiento de lana mineral usado en los muros de la vivienda pasiva estudiada ubicada en Chipre, evidenciando una de las ventajas de adoptar este tipo de modificaciones para el contexto particular estudiado (Kylili et al., 2017).

Por otro lado, enfocando el análisis en los cambios en las tendencias dentro de cada escenario mediante los valores calculados en la **Tabla 19**, se observa que el cambio relativo de cada categoría sigue un patrón similar en los escenarios CC6m, CC1a, CC2a, CE6m, CE1a y CE5a. Este consiste en una variación mayor para la escasez de recursos fósiles, seguida por el cambio climático, mientras que en el resto de categorías las variaciones son mucho menores, especialmente para la escasez de recursos minerales. Por su parte, el escenario CC5a presenta variaciones mínimas en todas las categorías pues, como se explicó en párrafos anteriores, sus resultados son muy cercanos a los del escenario base. Estos hallazgos refuerzan el concepto de la categoría de escasez de recursos fósiles como una de las apreciablemente influenciadas por el consumo de energía eléctrica variable considerado en los escenarios analizados, similarmente a la categoría de cambio climático, pero una medida ligeramente menor.

Asimismo, a partir de la **Tabla 20**, se identifica que el escenario con mayores valores de variabilidad, por margen apreciable, es el CE5a para todas las categorías excepto la escasez de recursos minerales, por lo que resulta conveniente profundizar más en este escenario. Al promediar los valores de la **Tabla 19** correspondientes al escenario CE5a para las seis categorías del patrón I, se obtiene que los modelos 1 y 2 representan el 63,0% y 61,3% de los impactos del modelo 3, por lo que el ratio de 3:3:5 (patrón I) sigue siendo válido. Similarmente, los resultados para la escasez de recursos minerales (patrón III) siguen conservando la misma razón entre los 3 modelos, es decir,

1:1:1. Por su parte, los resultados del agotamiento de ozono estratosférico (patrón II) pasaron de estar en proporción de 1:1:5 en el escenario base a 1:1:4 en el escenario CE5a, lo cual se interpreta como una variación pequeña en términos del ciclo de vida completo de las tres viviendas.

Entonces, luego de haber evaluado cómo cambian los resultados respecto a sus valores correspondientes en el escenario base (ver **Tabla 18**) y respecto al valor máximo en cada escenario (ver **Tabla 19**), además de haber identificado el escenario con mayores variaciones (ver **Tabla 20**) y comprobado que los patrones iniciales (I, II y III) no se vieron significativamente afectados, se puede afirmar que los resultados obtenidos son estables frente a los cambios considerados para el tiempo de uso de las viviendas y la demanda operacional de energía eléctrica y agua.

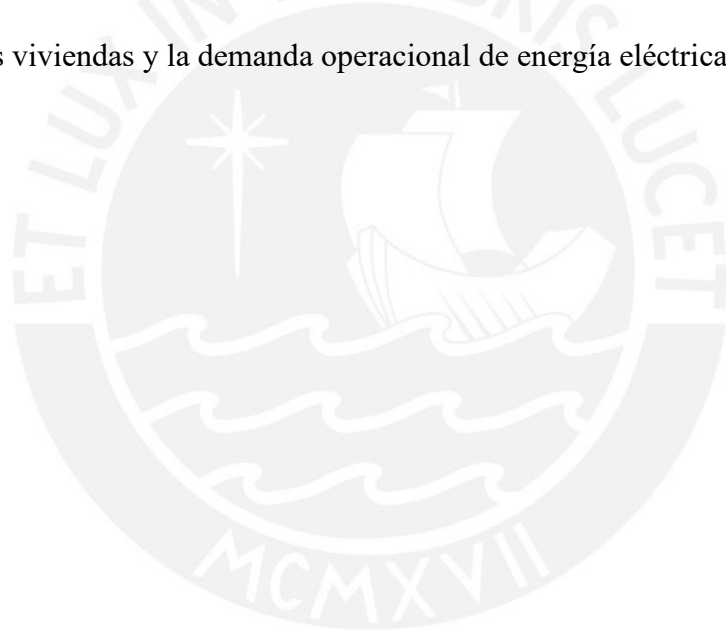
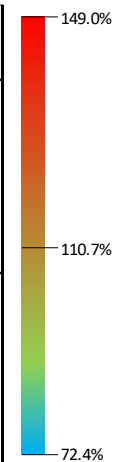


Tabla 18: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) expresados respecto a su análogo en el escenario base

Consumo operacional	Periodo de ocupación												Categoría de impacto	Patrón identificado
	6 meses			1 año			2 años			5 años				
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Conservador	78.1%	79.5%	87.0%	80.4%	81.6%	88.3%	84.8%	85.8%	90.9%	101.0%	100.2%	99.9%	Cambio climático	I
	86.9%	87.6%	92.3%	88.3%	88.8%	93.1%	91.0%	91.4%	94.7%	102.2%	100.9%	100.4%	Formación de ozono, salud humana	I
	90.6%	90.7%	94.2%	91.6%	91.7%	94.8%	93.5%	93.6%	96.0%	102.6%	101.7%	100.8%	Formación de material particulado fino	I
	86.9%	87.8%	92.4%	88.2%	89.0%	93.2%	90.9%	91.5%	94.7%	102.6%	101.6%	100.7%	Acidificación terrestre	I
	92.2%	92.1%	94.8%	93.1%	92.9%	95.3%	94.7%	94.6%	96.4%	102.8%	102.2%	101.2%	Eutrofización de agua dulce	I
	72.4%	72.8%	85.9%	75.2%	75.6%	87.3%	80.8%	81.1%	90.2%	100.9%	100.2%	99.9%	Escasez de recursos fósiles	I
	80.7%	80.6%	95.6%	82.7%	82.6%	96.1%	86.6%	86.5%	97.0%	100.3%	99.6%	99.9%	Agotamiento de ozono estratosférico	II
	96.4%	96.6%	96.2%	96.8%	97.0%	96.6%	97.6%	97.7%	97.4%	105.8%	105.0%	104.2%	Escasez de recursos minerales	III
Estándar	81.9%	83.1%	89.2%	87.9%	88.7%	92.8%	100.0%	100.0%	100.0%	138.9%	135.8%	122.5%	Cambio climático	I
	89.2%	89.7%	93.7%	92.8%	93.1%	95.8%	100.0%	100.0%	100.0%	124.8%	122.4%	113.6%	Formación de ozono, salud humana	I
	92.2%	92.3%	95.2%	94.8%	94.9%	96.8%	100.0%	100.0%	100.0%	118.8%	117.7%	110.8%	Formación de material particulado fino	I
	89.2%	89.9%	93.7%	92.8%	93.3%	95.8%	100.0%	100.0%	100.0%	125.3%	122.8%	113.9%	Acidificación terrestre	I
	93.6%	93.5%	95.7%	95.7%	95.6%	97.1%	100.0%	100.0%	100.0%	116.2%	115.8%	110.2%	Eutrofización de agua dulce	I
	77.2%	77.6%	88.3%	84.8%	85.0%	92.2%	100.0%	100.0%	100.0%	149.0%	147.4%	124.4%	Escasez de recursos fósiles	I
	84.1%	84.0%	96.4%	89.4%	89.3%	97.6%	100.0%	100.0%	100.0%	133.8%	133.3%	107.4%	Agotamiento de ozono estratosférico	II
	97.1%	97.2%	96.8%	98.0%	98.1%	97.9%	100.0%	100.0%	100.0%	111.8%	110.8%	110.7%	Escasez de recursos minerales	III



Nota: Todos los porcentajes se refieren a su análogo (mismo modelo y misma categoría de impacto) en el escenario base, por ello todos los valores del escenario base son 100%.

Tabla 19: Resultados por UF de la caracterización de los tres modelos analizados (M1, M2 y M3) expresados respecto al modelo de mayor impacto para cada categoría de impacto y escenario.

Consumo operacional	Periodo de ocupación												Categoría de impacto	Patrón identificado
	6 meses			1 año			2 años			5 años				
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Conservador	51.4%	53.4%	100.0%	52.0%	54.0%	100.0%	53.3%	55.1%	100.0%	57.8%	58.6%	100.0%	Cambio climático	I
	52.9%	53.5%	100.0%	53.2%	53.8%	100.0%	53.9%	54.4%	100.0%	57.2%	56.7%	100.0%	Formación de ozono, salud humana	I
	57.1%	55.3%	100.0%	57.3%	55.6%	100.0%	57.8%	56.0%	100.0%	60.4%	58.0%	100.0%	Formación de material particulado fino	I
	52.5%	54.4%	100.0%	52.9%	54.7%	100.0%	53.6%	55.3%	100.0%	56.9%	57.7%	100.0%	Acidificación terrestre	I
	62.7%	58.6%	100.0%	62.8%	58.8%	100.0%	63.2%	59.2%	100.0%	65.4%	60.9%	100.0%	Eutrofización de agua dulce	I
	41.3%	40.3%	100.0%	42.2%	41.2%	100.0%	43.9%	42.8%	100.0%	49.5%	47.7%	100.0%	Escasez de recursos fósiles	I
	18.3%	17.4%	100.0%	18.7%	17.8%	100.0%	19.4%	18.4%	100.0%	21.8%	20.6%	100.0%	Agotamiento de ozono estratosférico	II
	100.0%	99.7%	96.4%	100.0%	99.7%	96.4%	100.0%	99.6%	96.5%	100.0%	98.8%	95.2%	Escasez de recursos minerales	III
	52.5%	54.4%	100.0%	54.2%	55.8%	100.0%	57.2%	58.4%	100.0%	64.8%	64.7%	100.0%	Cambio climático	I
53.5%	54.0%	100.0%	54.4%	54.9%	100.0%	56.2%	56.4%	100.0%	61.7%	60.8%	100.0%	Formación de ozono, salud humana	I	
57.5%	55.7%	100.0%	58.1%	56.3%	100.0%	59.3%	57.4%	100.0%	63.6%	61.0%	100.0%	Formación de material particulado fino	I	
53.1%	54.9%	100.0%	54.1%	55.7%	100.0%	55.8%	57.2%	100.0%	61.4%	61.7%	100.0%	Acidificación terrestre	I	
63.0%	58.9%	100.0%	63.5%	59.4%	100.0%	64.4%	60.3%	100.0%	67.9%	63.4%	100.0%	Eutrofización de agua dulce	I	
42.8%	41.7%	100.0%	45.0%	43.8%	100.0%	49.0%	47.6%	100.0%	58.6%	56.4%	100.0%	Escasez de recursos fósiles	I	
18.9%	18.0%	100.0%	19.9%	18.9%	100.0%	21.7%	20.6%	100.0%	27.1%	25.6%	100.0%	Agotamiento de ozono estratosférico	II	
100.0%	99.7%	96.4%	100.0%	99.6%	96.5%	100.0%	99.5%	96.7%	100.0%	98.6%	95.7%	Escasez de recursos minerales	III	

Nota: Para cada combinación de categoría de impacto-escenario se expresan los impactos de los 3 modelos respecto al mayor de cada terna, por ello uno de cada tres valores siempre será 100%.

Tabla 20: Variabilidad de cada categoría de impacto para cada escenario evaluado, con respecto al escenario base, según se define al inicio de esta sección.

Consumo operacional	Periodo de ocupación												Categoría de impacto	Patrón identificado
	6 meses			1 año			2 años			5 años				
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Conservador	3.1%			2.8%			2.1%			0.2%			Cambio climático	I
	1.8%			1.6%			1.2%			0.4%			Formación de ozono, salud humana	I
	1.3%			1.1%			0.9%			0.4%			Formación de material particulado fino	I
	1.8%			1.6%			1.2%			0.5%			Acidificación terrestre	I
	1.0%			0.9%			0.7%			0.4%			Eutrofización de agua dulce	I
	4.3%			3.8%			2.9%			0.2%			Escasez de recursos fósiles	I
	1.9%			1.7%			1.3%			0.0%			Agotamiento de ozono estratosférico	II
	0.2%			0.2%			0.1%			0.7%			Escasez de recursos minerales	III
Estándar	2.5%			1.6%			0.0%			4.0%			Cambio climático	I
	1.5%			1.0%			0.0%			2.9%			Formación de ozono, salud humana	I
	1.0%			0.7%			0.0%			2.2%			Formación de material particulado fino	I
	1.5%			0.9%			0.0%			2.9%			Acidificación terrestre	I
	0.8%			0.5%			0.0%			1.9%			Eutrofización de agua dulce	I
	3.5%			2.2%			0.0%			5.3%			Escasez de recursos fósiles	I
	1.6%			1.0%			0.0%			3.0%			Agotamiento de ozono estratosférico	II
	0.2%			0.1%			0.0%			0.4%			Escasez de recursos minerales	III

Nota: Cada combinación de categoría de impacto-escenario tiene un grado de variabilidad asociado. Para cuantificarlo, se calcularon las desviaciones estándar para cada terna de resultados de **Tabla 19**. En la tabla actual se muestra, para cada escenario, el valor absoluto de la diferencia de desviaciones estándar entre dicho escenario y el escenario base, considerando la misma categoría de impacto.

Nota: Una variabilidad cercana a cero se interpreta como un cambio homogéneo para los resultados de los 3 modelos, mientras que un valor alto implica una variación más heterogénea para los resultados de cada modelo.

5.3. Comparación con otras VTE y viviendas permanentes a nivel de Ciclo de Vida

Esta comparación se enfoca exclusivamente en el potencial de calentamiento global (PCG) y la demanda energética operacional, puesto que son de los pocos parámetros que consistentemente forman parte del alcance de la mayoría de estudios revisados. A grandes rasgos, estas investigaciones pueden ser clasificadas según si su objeto de estudio es una vivienda temporal de emergencia (VTE) o una vivienda permanente. Se resalta que, a fin de procurar que esta comparación sea lo más equitativa posible pese a que estos trabajos tienen diversas unidades funcionales, sus resultados han sido homogeneizados a valores anuales por unidad de área, considerando todas las etapas del ciclo de vida analizadas en cada estudio. Por la misma razón, para varios de los casos que evalúan múltiples escenarios, se ha seleccionado el de características más similares al promedio del grupo. Por ejemplo, para los ACV de VTE se han priorizado, en la medida de lo posible, los escenarios en los que la vida útil es de 2 años porque ese es el periodo considerado para el escenario base de esta tesis.

Asimismo, para brindar mayor evidencia de la influencia de la vida útil de la edificación sobre el PCG, se incluye adicionalmente una adaptación de los modelos analizados en esta tesis a un periodo de ocupación de 50 años, que coincide con la mayoría de casos de vivienda permanente. El PCG de dicho nuevo escenario fue estimado, *grosso modo*, multiplicando por 25 los impactos de la etapa de uso y manteniendo el resto sin cambios, por lo que omite en gran medida el mantenimiento que estas VTE pueden necesitar a lo largo de su nueva vida útil extendida. La **Tabla 21** muestra los resultados homogeneizados de cada caso de estudio y algunos de los parámetros más influyentes en estos, como las etapas del ciclo de vida incluidas dentro del alcance, el área y la vida útil de la edificación y las funciones consideradas para el cálculo de la energía operativa.

Para entender las diferencias entre los valores de PCG y demanda energética obtenidos, se debe tener presente que una demanda energética elevada casi siempre implica un PCG de la misma magnitud, salvo que la mayor parte de dicha energía provenga de fuentes renovables, lo cual depende de la matriz energética nacional de cada caso. A su vez, un factor determinante en esta demanda es el uso de sistemas HVAC dado que suelen tener un consumo intensivo, especialmente en zonas con climas severos. Asimismo, factores como los patrones de consumo energético de los habitantes o el área por persona dentro de la vivienda, que pueden depender en gran medida del NSE o del contexto cultural local de cada hogar, repercuten directamente en los valores comparados, dado que estos se calculan por unidad de área.

En primer lugar, teniendo en cuenta solo los casos de VTE, el PCG de las viviendas de este trabajo es marcadamente inferior a la mayoría de los otros casos. Al comparar sus respectivos promedios, el de los tres modelos de esta tesis representa solo el 28,4% del correspondiente al resto de VTE. Esta desigualdad tan pronunciada puede ser atribuida a que los estudios anteriores revisados, es decir, los de Seike et al. (2019), Hosseini et al. (2021) y Atmaca & Atmaca (2016), sí consideran sistemas HVAC, que representan entre 72,2-82,2% de la demanda energética operacional de estos casos, incrementándola sustancialmente, lo cual, a su vez, contribuye al aumento del PCG.

Asimismo, uno de los motivos por los que los modelos de Hosseini tienen un menor PCG que los de Seike podría ser explicado considerando que el primero trabajó bajo el supuesto de que sus VTE serían usadas durante 50 años, un periodo mucho más largo a los 2 años típicos de la mayoría de casos de esta clase. Esto sucede debido a que los impactos de las etapas de producción y construcción, que solo tienen lugar una vez, reparten su contribución anual entre un número mucho mayor de años, reduciendo drásticamente el PCG anual de toda la vivienda.

Análogamente, analizando solo los casos de vivienda permanente, se observa que los valores de PCG de los casos peruanos, es decir, de los trabajos de García (2014), Cáceres (2016) y Corzo (2016), son cercanos entre sí pero considerablemente superiores al resto, lo que contrasta los resultados de Li & Froese (2016), Balasbanch et al. (2019) y Soust-Verdaguer et al. (2020), que son los de menor PCG. Una diferencia fundamental entre estos dos grupos de viviendas es la cimentación, que en el caso de las edificaciones peruanas es masiva y de concreto (zapatas y cimientos corridos), mientras que en el resto de modelos, esta no fue incluida dentro del alcance o es mucho más pequeña.

Esta idea es consistente con los resultados excepcionales de Kylili et al. (2017), que son el único caso de vivienda permanente del extranjero con PCG superior al de los casos peruanos. En dicho modelo de vivienda, la cimentación es masiva de concreto, similarmente a los casos peruanos, y es responsable del 63,27% del PCG total (Kylili et al., 2017). Pese a ello, otros resultados, como los de Li & Froese (2016), siguen siendo inusualmente bajos, aun cuando el alcance de este estudio incluye únicamente a la envolvente del edificio; no obstante, el área de la vivienda es bastante amplia, lo cual puede explicar parcialmente este resultado, pues en estudios como el de Atmaca & Atmaca (2016) se halló que las viviendas con mayor área son más eficientes energética y económicamente (Atmaca & Atmaca, 2016).

En ese sentido, un caso similar es el estudiado por García, que tiene mayor área por unidad de vivienda y menor PCG que el resto de casos peruanos. Es importante mencionar que algunas funciones operativas como la iluminación y calefacción dependen directamente del área de la vivienda, mientras que otras, como el uso de electrodomésticos, están más influenciadas por la cantidad de habitantes. Ello explicaría también por qué las demandas operacionales de los casos de

Cáceres y Corzo son mayores a las de García, especialmente cuando en ninguno de estos casos hay sistemas HVAC.

Por otro lado, en el caso analizado por Petrovic et al. (2019), se determinó que el concreto usado en la cimentación es el material con mayor PCG durante la etapa de producción; sin embargo, sus resultados anuales por metro cuadrado son menores a lo esperado de una vivienda con este tipo de cimentación. Uno de los factores que genera esta desviación en definitiva es el tiempo de vida de 100 años considerado por el autor, periodo excepcionalmente largo incluso para viviendas permanentes. Análogamente, en el caso de estudio de Atmaca & Atmaca (2016) se determinó que la cimentación fue la parte de la edificación con mayor contenido de energía incorporada para los dos modelos estudiados, el cual oscila entre 31,3-38,9% del total de las etapas de producción y construcción (Atmaca & Atmaca, 2016).

Comparando globalmente los casos de VTE y vivienda permanente, los primeros exhiben valores de PCG notablemente superiores, con un promedio de 185,7 kg CO₂-eq/m²año frente a solo 14,1 kg CO₂-eq/m²año del segundo grupo. Si bien estos promedios se ven afectados por casos excepcionales, como los modelos analizados por Li & Froese, esta desigualdad tan pronunciada tiene su origen en otros factores. Una de las principales diferencias entre ambos grupos de modelos es el tiempo de vida útil, que, como se mencionó anteriormente, al ser muy largo disminuye significativamente el PCG. Visto desde el punto de vista opuesto, una vida útil corta, como los 2 años correspondientes a los casos de VTE, genera que todos los impactos de las etapas de producción y construcción sean repartidos entre pocos años, resultando en valores muy altos de PCG, lo suficiente incluso como para opacar el efecto de no tener sistemas HVAC. Ejemplo de ello son los modelos de esta tesis, que tienen un PCG anual mayor al de todas las viviendas permanentes, a excepción del caso de Kylili. En cuanto a las demandas operacionales, para los

modelos que incluyen sistemas HVAC, las VTE tienen demandas superiores a las viviendas permanentes, mientras que en los casos que no utilizan estos sistemas, es decir, todos los estudios peruanos, las demandas son, en general, similares.

Por último, enfocando solo el escenario nuevo de los modelos de esta tesis, es decir, con un tiempo de ocupación de 50 años, pero manteniendo el resto de características sin cambios, se obtiene un PCG promedio para los 3 modelos de 14,2 kg CO₂-eq/m²año. Este valor es menor al correspondiente al resto de casos peruanos, lo cual puede atribuirse al uso de materiales más ligeros y ecoamigables, junto con una menor utilización de electrodomésticos para la etapa de uso que corresponde al contexto de emergencia considerado para este estudio. Por otro lado, la mayoría de casos extranjeros de vivienda permanente tienen un PCG solo ligeramente inferior, lo cual refuerza la idea anterior de que la vida útil de las viviendas influye determinadamente en los valores anuales de PCG, pues al no haber diferencias significativas entre ellas, los resultados de estos casos extranjeros y del nuevo escenario de los modelos de esta tesis se acercan drásticamente.

Tabla 21: Potencial de calentamiento global, demanda energética operacional y características más importantes de los casos revisados de ACV aplicado a VTE (casos por encima de la línea punteada) y vivienda permanente (casos por debajo de la línea punteada).

Caso de estudio	Sistema analizado	Etapas del ciclo de vida incluidas												Modelos evaluados	Área (m ²)	Vida útil (años)	Funciones incluidas para energía operativa	Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ e/m ² año)	Demanda energética operacional (kWh/m ² año)	Consideraciones	
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7								C1
Estudio actual	Tres modelos de VTE usados en Perú y Chile	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	M1 - madera machihembrada	18.0	2	Iluminación, pocos electrodomésticos	50.3	33.2	Se compara el escenario base.
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	M2 - paneles <i>superboard</i>	18.9	2		51.4	31.7	
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	M3 - paneles SIP OSB	17.3	2		88.0	34.6	
Seike et al. 2019	Tres modelos de VTE usados en Kamaishi, Japón	X	X	X	X					X			X	X	M1a - marcos de acero SAC	29.7	2	HVAC, iluminación, electrodomésticos	445.5	491.9	Se compara el caso con vida útil de 2 años.
		X	X	X	X					X			X	X	M1b - marcos de acero SAC con reúso	29.7	2		357.0	491.9	
		X	X	X	X					X			X	X	M2 - marcos de acero HC	29.7	2		402.0	428.3	
		X	X	X	X					X			X	X	M3 - marcos de madera HC	29.7	2		380.0	436.7	
		X	X	X	X					X			X	X	I1 - aislada 1 nivel	20.0	50		157.8	260.1	
Hosseini et al. 2021	Seis configuraciones para VTE usadas en Bam, Irán	X	X	X	X	X				X		X		I2 - aislada 2 niveles	40.0	50	HVAC	72.3	119.1		
		X	X	X	X	X				X		X		SF1 - unifamiliar 1 nivel	20.0	50		157.6	259.7		
		X	X	X	X	X				X		X		SF2 - unifamiliar 2 niveles	40.0	50		71.4	117.7		
		X	X	X	X	X				X		X		SD1 - semiseparada 1 nivel	20.0	50		126.7	208.7		
		X	X	X	X	X				X		X		SD2 - semiseparada 2 niveles	40.0	50		54.3	89.5		
Atmaca & Atmaca 2016	Dos modelos de VTE usados en Gaziantep, Turquía	X	X	X	X	X				X		X	X	M1 - concreto prefabricado	70.0	15	HVAC, iluminación, electrodomésticos	-	283.7		
		X	X	X	X	X				X		X	X	M2 - contenedor metálico	20.0	15		-	382.6		
García 2014	Vivienda unifamiliar NSE A ubicada en Lima, Perú	X	X	X	X	X				X		X	X	M1 - unifamiliar concreto armado	478.0	50	Iluminación, electrodomésticos	18.7	14.7		
Cáceres 2016	Dos viviendas multifamiliares NSE C y A ubicadas en Lima, Perú	X	X	X	X	X				X	X	X		M1 - multifamiliar ductilidad limitada	9409.0	50	Iluminación, electrodomésticos	42.6	38.3		
		X	X	X	X	X				X	X	X		M2 - multifamiliar sistema dual	1779.0	50		46.5	28.3		
Corzo 2016	Vivienda unifamiliar NSE B ubicada en Huancayo, Perú	X	X	X	X	X				X		X	X	M1 - unifamiliar bloques de concreto	130.0	50	Iluminación, electrodomésticos	36.1	34.6		
Zabalza Bribián et al. 2009	Vivienda unifamiliar ubicada en Zaragoza, España	X	X	X						X				M1 - unifamiliar muros de ladrillo de arcilla	221.5	50	HVAC	12.6	34.2		
Li & Froese 2016	Tres alternativas de envolvente para una vivienda unifamiliar ubicada en Canadá	X	X	X	X	X				X				M1a - paneles SIP MgO importados	433.9	50	Solo calefacción	0.6	1.7		
		X	X	X	X	X				X				M1b - paneles SIP MgO locales	433.9	50		0.4	1.7		
		X	X	X	X	X				X				M2 - paneles SIP OSB	433.9	50		0.4	1.7		
		X	X	X	X	X				X				M3 - marcos de madera	433.9	50		0.3	3.0		
Soust-Verdaguer et al. 2020	Vivienda unifamiliar ubicada en Montevideo, Uruguay	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	M1 - unifamiliar muros portantes de albañilería artesanal	57.0	60	HVAC, iluminación, electrodomésticos	4.3	191.0		
Petrovic et al. 2019	Vivienda unifamiliar ubicada en Dalarna, Suecia	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	M1 - unifamiliar madera	180.4	100	HVAC, iluminación, electrodomésticos	5.7	146.0	La demanda energética no incluye los ahorros por paneles fotovoltaicos. El PCG solo considera las etapas de producción y construcción.	
Kylli et al. 2016	Vivienda pasiva unifamiliar ubicada en Nicosia, Chipre	X	X	X	X									M1 - unifamiliar pasiva	185.0	50	HVAC	55.4	16.1		
Monteiro et al. 2021	Vivienda unifamiliar ubicada en Coimbra, Portugal, considerando diferentes orientaciones y distribuciones de ventanas	X	X	X	X	X	X	X		X				M1 - unifamiliar concreto armado	133.0	50	HVAC	-	9.0	Se compara el escenario base (compacto, ratio de ventanas a muros 5%)	
Balasbaneh et al. 2019	Cinco alternativas de estructura y muros para vivienda unifamiliar ubicada en Kuantan, Malasia	X	X	X	X	X				X	X			M1 - bloques de concreto	115.0	50	-	4.3	-	Se compara el escenario sin ocurrencia de inundación.	
		X	X	X	X	X				X	X			M2 - marcos de concreto prefabricado	115.0	50		2.7	-		
		X	X	X	X	X				X	X			M3 - marcos de acero	115.0	50		3.3	-		
		X	X	X	X	X				X	X			M4 - prefabricado de madera	115.0	50		2.0	-		
		X	X	X	X	X				X	X			M5 - ladrillo de arcilla	115.0	50		3.0	-		
Estudio actual, escenario nuevo (50 años)	Tres modelos de VTE usados como vivienda permanente	X	X	X	X	X				X	X	X		M1 - madera machihembrada	18.0	50	Iluminación, pocos electrodomésticos	13.7	33.2	Escenario nuevo con 50 años de vida útil. Valores de PCG estimados multiplicando por 25 los impactos de la etapa de uso del escenario base.	
		X	X	X	X	X				X	X	X		M2 - paneles <i>superboard</i>	18.9	50		13.2	31.7		
		X	X	X	X	X				X	X	X		M3 - paneles SIP OSB	17.3	50		15.7	34.6		

A1 Suministro de materias primas; A2 Transporte; A3 Manufactura; A4 Transporte a sitio de construcción; A5 Instalación en obra; B1 Uso/Aplicación; B2 Mantenimiento; B3 Reparación; B4 Reemplazo; B5 Remodelación; B6 Uso de energía operacional; B7 Uso de agua operacional; C1

Deconstrucción/Demolición; C2 Transporte; C3 Tratamiento de residuos; C4 Disposición

HVAC: Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado

Para la columna "Funciones incluidas para energía operativa", los casos de estudio que indican "consumo energético doméstico" han sido interpretados como consumo por iluminación y electrodomésticos.

6. Conclusiones

Las conclusiones del estudio son presentadas siguiendo el mismo orden de los capítulos desarrollados.

De la revisión de la literatura se puede concluir que el ACV es una técnica aplicable, dentro del sector de construcción residencial, a una diversidad de casos con contextos muy variados, los cuales suelen determinar el énfasis de cada investigación. Además, estas pueden ser realizadas empleando diferentes metodologías, bases de datos y softwares especializados. Asimismo, la aplicación del ACV a edificaciones en general ha sido, durante los años recientes, un área de investigación en constante progreso.

Por otro lado, el uso de viviendas temporales de emergencia como parte de la respuesta frente a desastres naturales ha sido un recurso necesario a lo largo de la historia, y se prevé su utilización será más frecuente en el futuro cercano debido a las actuales tendencias crecientes de peligros relacionados al clima, población que habita zonas propensas a estos, vulnerabilidad social y migraciones masivas (Atmaca & Atmaca, 2016; Hosseini et al., 2021). Se revisaron casos históricos en los que estas viviendas fueron empleadas, en distintas formas y para diferentes emergencias. Los criterios principales identificados desde los casos más antiguos han sido la facilidad y rapidez de construcción y transporte, además de la habitabilidad, es decir, la garantía de que los ocupantes tendrán un estándar determinado de confort para que puedan mantener una calidad de vida aceptable durante el tiempo que dure la reconstrucción. Otros criterios empleados con frecuencia, ligeramente en menor medida que los anteriores, son la disponibilidad de materiales y la posibilidad de traslado de la vivienda. En cambio, la temporalidad de estas viviendas y su enfoque transicional son conceptos que han ido evolucionando durante el último siglo. Las

viviendas temporales descritas evidencian una gran variedad de diseños y materiales usados, así como soluciones innovadoras para las necesidades típicas de las emergencias.

Revisando el caso específico peruano, experiencias anteriores como el terremoto de Pisco de 2007 denotan que el manejo de emergencias nacionales ha sido deficiente en cuanto a prevención y mitigación, debido a las importantes pérdidas humanas y materiales, y en cuanto a la respuesta post desastre, lo que se evidenció en una recuperación muy lenta y en condiciones precarias prolongadas para algunos grupos de damnificados. No se debe menospreciar el hecho de que en la última década se han realizado cambios positivos para la GRD en Perú; no obstante, aún hay muchos obstáculos que superar.

Posteriormente, al estudiar la metodología del ACV, se puede afirmar que es una herramienta con muchas ventajas tales como tener un enfoque holístico orientado a evitar el traslado de problemas entre distintos procesos y etapas del ciclo de vida de un producto (ISO, 2006a). El ACV es un método que prioriza el enfoque científico, además de ser sistemático, estar estandarizado por distintas normas a nivel global. Al desarrollar un ACV, se debe tener en cuenta que el nivel de detalle del estudio depende de los objetivos y el alcance definidos; que su enfoque es relativo a la unidad funcional escogida; que, al requerirse construir una idealización sobre un aspecto de la realidad, siempre existirán suposiciones implícitas que deben ser documentadas y consideradas; que sus resultados se refieren a impactos potenciales, no a predicciones precisas; y que es un proceso riguroso, que frecuentemente requerirá de una cantidad extensa de información, por lo que las bases de datos y las herramientas informáticas serán indispensables en la mayoría de casos.

Asimismo, no deben ignorarse las limitaciones a las que está sujeto el ACV, las cuales frecuentemente involucran dificultades para la obtención de la información necesaria, así como la

falta de esta o una excesiva incertidumbre asociada. Se reitera que el ACV se enfoca sobre el aspecto medioambiental, que es solo uno de los tres pilares de la sostenibilidad; sin embargo, sus resultados pueden ser empleados en conjunto con otras herramientas, tal como ejemplifican los trabajos de Balasbaneh et al. (2019), Hosseini et al. (2021) y Atmaca & Atmaca (2016).

En cuanto a la aplicación del ACV a edificaciones, se enfatizó que estas son productos complejos, variables en tamaño, formas, equipamiento y tiempo de vida, además de que cumplen simultáneamente varias funciones. Fueron descritas también las consideraciones metodológicas más comunes para los casos e ACV aplicado a edificaciones, como la definición de una UF adecuada y las etapas principales del ciclo de vida de una edificación (producción, construcción, uso y fin de vida). Asimismo, se enumeraron aspectos que suelen ser determinantes para los resultados del ACV tales como el clima y la matriz energética locales, la vida útil y las propiedades térmicas del edificio, el equipamiento incluido y el comportamiento de los usuarios, que para este estudio juega un rol importante.

Se reconoce que el ACV es globalmente considerado como uno de los métodos más completos para el análisis ambiental de edificaciones, además de tener varias aplicaciones para los distintos involucrados en el sector construcción, tales como la comparación de alternativas de diseño y para complementar criterios de certificación energética. Pese a esto, existen factores como los prejuicios sobre su complejidad y precisión, además de las dificultades para entender y aplicar sus resultados, que constituyen barreras importantes para la expansión de su uso en el sector construcción (Soust-Verdaguer et al., 2016). Por ello, se recopilieron algunas estrategias de simplificación del proceso, entre las que está la incorporación de herramientas CAD y BIM en el proceso del ACV.

Respecto al contexto particular del caso de estudio de este trabajo, se buscó plantear un escenario realista y factible basado en una revisión de los peligros naturales en el Perú y considerando distintos tipos de vulnerabilidad asociada a aspectos demográficos y socioeconómicos. Se optó por plantear el escenario hipotético de la ocurrencia de un sismo $M_w = 8,0$ en la ciudad de Lima como caso de análisis. Esta elección influyó en la decisión de las viviendas a analizar, así como en las suposiciones respecto a las distintas etapas de su ciclo de vida. Las elevadas cifras estimadas para las pérdidas humanas y materiales, tales como el número de víctimas, heridos y los niveles de daño esperados para la infraestructura de salud y educativa, evidencian la necesidad de cambios profundos en el manejo de estas situaciones de emergencia.

Los tres modelos de vivienda temporal analizados fueron escogidos a partir de la premisa de que la madera es un material ecoamigable y es posible emplearla como parte de otros materiales compuestos para llegar a diferentes soluciones residenciales, cuyas ventajas y desventajas fueron investigadas en esta tesis. Asimismo, se tuvieron en cuenta criterios de facilidad y rapidez de transporte y armado; de confort para sus habitantes, dadas las condiciones climáticas locales; y de durabilidad para poder cubrir el periodo que dure la reconstrucción de los hogares definitivos de los damnificados. Se reitera que estas viviendas efectivamente han sido utilizadas en emergencias pasadas por desastres naturales en Perú y Chile. Seguidamente, estos tres modelos de vivienda fueron descritos con detalle, según sus principales elementos y materiales constituyentes.

Las elecciones metodológicas más importantes fueron la unidad funcional, es decir, 1 m^2 de área habitable de las viviendas, y los límites del sistema. Para ambos casos se valoró la comparabilidad entre las tres viviendas estudiadas y entre estas y otros estudios de ACV aplicado a VTE y viviendas permanentes. Con la excepción de las subetapas de tratamiento y disposición de residuos (C3 y C4) en las que hubo limitaciones de información, se buscó que el ciclo de vida de los modelos sea lo

más completo posible, por lo que se abarcaron dentro del análisis incluso las etapas cuyos impactos se esperaba que fueran menores a fin de investigar a profundidad el ciclo de vida de las VTE, el cual es un tema relativamente menos explorado dentro del campo del ACV aplicado a edificaciones. Las consideraciones para la elaboración del inventario y el análisis de impacto, tales como las ocho categorías de impacto escogidas para esta tesis, estuvieron basadas en la revisión de la literatura y en el contexto del caso definido en la sección 4.1.

Para el modelado se empleó el software SimaPro 9.1 usando la base de datos Ecoinvent 3.6 – APOS – *Unit Processes* y la metodología ReCiPe 2016 midpoint (H) v1.04 para el análisis de impacto. Las principales limitaciones estuvieron relacionadas a información incompleta sobre algunos materiales de construcción en la documentación técnica de los modelos de vivienda analizados y también en las bases de datos usadas para la elaboración del inventario, por lo que se rescata una de las recomendaciones de Trabucco & Wood (2016): los productores de materiales deben invertir recursos en producir y publicar declaraciones ambientales de sus productos, a fin de permitir un análisis más preciso y actual por parte de los usuarios del ACV.

De los resultados del escenario base se puede afirmar que, para los tres modelos analizados, la etapa de producción es la más significativa del ciclo de vida por amplio margen, lo cual se evidencia en que el aporte de esta etapa respecto al total del ciclo de vida, para las ocho categorías de impacto seleccionadas y los tres modelos de vivienda, oscila entre 66,3-95,8%, con un promedio de 84,7%. Por su parte, la etapa de uso representa entre 3,8-30,4% de los impactos totales del ciclo de vida, con un promedio de 13,3%, mientras que las etapas de construcción y fin de vida son bastante inferiores, siempre por debajo del 2,7%. Esta distribución de los impactos se atribuye a las características de las viviendas temporales, es decir, construcción manual, tiempo de ocupación relativamente corto comparado con otras viviendas, pocos electrodomésticos, mantenimiento

sencillo y demolición manual. Todos estos factores reducen los impactos de las etapas de construcción, uso y fin de vida, por lo que la producción gana bastante importancia relativa.

Comparando entre sí los resultados de los tres modelos de vivienda, se observó que las contribuciones a las diferentes categorías de impacto seguían tres patrones marcadamente distintos.

El patrón I incluye a las categorías de cambio climático, formación de ozono, formación de material particulado fino, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce y escasez de recursos fósiles, cuyos impactos son aproximadamente proporcionales a una razón de 3:3:5 para los modelos 1, 2 y 3, respectivamente. Para el modelo 3, se identificó a componentes de los paneles SIP como el principal factor para los mayores impactos de la vivienda, mientras que para los modelos 1 y 2 hubo en cambio una serie de materiales y procesos con impactos relativamente equitativos, entre los que están el acero, los tableros de *triplay*, las planchas de fibrocemento, la energía eléctrica consumida durante la etapa de uso, etc.

El patrón II corresponde a la categoría de agotamiento del ozono estratosférico, en la que los impactos de los modelos 1 y 2 son aproximadamente el 20% de impacto del modelo 3, en el que nuevamente los tableros SIP fueron responsables de la mayor parte de los impactos; sin embargo, esta vez los impactos de los modelos 1 y 2 fueron mayoritariamente atribuibles al consumo de energía eléctrica, a la fabricación de los kits de IIEE y a los tableros de *triplay*.

Por último, el patrón III se refiere a la categoría de agotamiento de recursos minerales, en la que los tres modelos obtuvieron impactos bastante cercanos. Los materiales con mayor relevancia fueron las pinturas, el zinc y el acero, con impactos que oscilan entre 16,3-26,1%. Un caso excepcional fue el de las planchas de *superboard* del modelo 2, que representan el 55,5% de los

impactos en esta categoría debido a su uso intensivo y a que en su proceso de fabricación intervienen diversos elementos tales como el zinc.

Estos resultados fueron posteriormente sometidos a un análisis de sensibilidad, en el cual se evaluaron siete escenarios alternativos adicionales en los que se consideraron diferentes periodos de ocupación y patrones de consumo de energía eléctrica y agua. Se observó que las categorías de impacto más fuertemente influenciadas por las nuevas suposiciones fueron la escasez de recursos fósiles y el cambio climático, con respectivas variaciones máximas de 49,0% y 38,9% impactos adicionales a los hallados escenario base. Ambos resultados corresponden al modelo 1, escenario CE5a, que fue cuantitativamente identificado como el más variable, por lo que se profundizó en él y se halló que, pese a estas variaciones, los patrones I, II y III observados en los resultados de las categorías de impacto del escenario base se mantuvieron sin alteraciones importantes. Por ello, se concluye que los resultados obtenidos de la comparación de los tres modelos analizados en el escenario base son estables frente a las diferentes elecciones de periodo de uso y patrón de consumo operacional de sus habitantes y las conclusiones establecidas a partir de ellos se adaptan adecuadamente a la mayoría de casos probables ante una situación de emergencia real causada por un sismo $M_w = 8,0$ en la ciudad de Lima.

A la luz de estos hallazgos y desde un punto de vista exclusivamente medioambiental, se señala al modelo 3 como el menos conveniente del grupo analizado, puesto que sus impactos ambientales son considerablemente mayores a los correspondientes a los otros dos modelos para siete de las ocho categorías de impacto analizadas. Es posible que, bajo un contexto diferente al peruano, algunas de las ventajas comparativas del modelo 3, como podría ser un ahorro en energía operacional de calefacción gracias al mayor confort térmico proporcionado por su envolvente más sofisticada, lleguen a compensar los elevados impactos de sus materiales de construcción. Como

se explicó anteriormente, para este modelo fue posible identificar a los paneles SIP como el principal origen de los impactos ambientales en siete de las ocho categorías de impacto analizadas, por lo que, si estos pudieran ser mitigados, por ejemplo, modificando el proceso productivo, el modelo 3 podría obtener resultados competitivos para su aspecto medioambiental.

En cuanto a los modelos restantes, las diferencias relativas entre los impactos de los modelos 1 y 2 son menores a 5% para todas categorías estudiadas, a excepción de la eutrofización de agua dulce, en la que la diferencia es de 6,3%. Por ello, se concluye que, bajo las suposiciones y limitaciones de este estudio, los impactos ambientales de ambos modelos no son significativamente diferentes y, bajo este criterio, ambas son opciones viables para su uso en eventuales situaciones de emergencia en Lima, según se definió en el contexto del estudio.

En cuanto al uso de madera y materiales compuestos a base de esta, se verifica que es posible equiparar los bajos impactos ambientales de la primera, al mismo tiempo que se consigue un material más durable, como demostraron los paneles de *superboard* del modelo 2, cuya vida útil es de 5 años, frente a los 3 años de los paneles machihembrados del modelo 1. Pese a ello, la decisión final sobre el modelo más conveniente debe, adicionalmente, considerar aspectos económicos, como el costo de construcción, el costo de mantenimiento; sociales, como el tiempo de construcción, el tiempo de entrega, el confort termal y acústico, la seguridad frente a incendios o robos, la aceptación por parte de los futuros usuarios; y otros criterios técnicos y de transparencia, como los niveles de estandarización, modulación e industrialización (Hosseini et al., 2021; Vázquez-Rowe, Córdova-Arias, Brioso, & Santa-Cruz, 2021). Solo con un enfoque holístico y consecuente con las necesidades particulares de cada desastre se podrá determinar con certeza la elección final.

Por otra parte, de la comparación de los modelos de esta tesis con otros casos de ACV de VTE y vivienda permanente, se ha observado que la inclusión de sistemas HVAC es un factor determinante en la demanda energética operacional no solo para las viviendas permanentes, sino también para las VTE. Asimismo, la inclusión de la cimentación de las respectivas edificaciones dentro de los límites del sistema, así como su material y tamaño, ha demostrado ser uno de los elementos más influyentes en el potencial de calentamiento global total de las viviendas.

Otro de los hallazgos principales de este estudio es que, pese a que podría intuirse que las VTE son menos contaminantes que las viviendas permanentes al emplear una cantidad mucho menor de materiales, que estos suelen conformar edificaciones percibidas como más ligeras y que las VTE incluyen menos ambientes y comodidades al estar enmarcadas en un contexto de recuperación por algún desastre, al considerar el potencial de calentamiento global anual promedio por unidad de área, se observó que las VTE presentan impactos significativamente mayores a las viviendas permanentes estudiadas. Esto se atribuye principalmente a la relativamente corta vida útil de las VTE, que ocasiona que todos los impactos de las etapas de producción y construcción sean repartidos entre pocos años, elevando sustancialmente el potencial de calentamiento global anual de las VTE, incluso al punto de superar el efecto de otros factores como la inclusión de sistemas HVAC en las viviendas permanentes.

Como reflexión final, considerando que Perú es uno de los diez países más vulnerables al cambio climático (Miranda Sara et al., 2016) y que la mitigación de riesgos a través de la reducción de la vulnerabilidad es una de las tareas de los ingenieros civiles (Santa Cruz, 2011b), resulta crucial evitar seguir acumulando impactos ambientales a fin de no llegar a un punto de inflexión sin retorno que resulte en una nueva crisis ambiental y que esta trascienda a los demás ámbitos de nuestra sociedad. En ese sentido, se espera haber contribuido con información útil para incorporar criterios

medioambientales en las decisiones ante un posible desastre natural y se hace énfasis en una postura compartida por otros autores: los riesgos por desastres no son “naturales”, sino que tienen su origen en cómo la humanidad ha construido sobre su entorno debido a las diferentes dinámicas políticas, económicas y culturales que vinculan a la sociedad con el mundo físico a lo largo de escalas geográficas y temporales (French et al., 2020; Miranda Sara et al., 2016); este hecho constituye una motivación adicional tomar un papel más proactivo en el camino hacia una GRD sustentable.



7. Bibliografía

- Abad Pérez, C. (2009). Huaycos en 1987 en el distrito de Lurigancho-Chosica (Lima-Perú). <https://doi.org/10.4000/bifea.2272>
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Arboccó Valderrama, H. A. (n.d.). *Modelo de vivienda temporal para uso en zonas sísmicas*. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO).
- Athena Sustainable Materials Institute. (2011). Athena Impact Estimator for Buildings. Retrieved October 2, 2021, from <http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/>
- Atmaca, A., & Atmaca, N. (2016). Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings. *Applied Energy*, 171(March 2011), 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.058>
- Balasbaneh, A. T., Bin Marsono, A. K., & Gohari, A. (2019). Sustainable materials selection based on flood damage assessment for a building using LCA and LCC. *Journal of Cleaner Production*, 222, 844–855. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.005>
- BBC. (2020). El hombre que “ha tenido más impacto en la atmósfera que cualquier otro organismo en la historia de la Tierra.” Retrieved June 15, 2021, from BBC News Mundo website: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-54638654>
- Bicudo, T. C., Sacek, V., & Paes de Almeida, R. (2020). Reappraisal of the relative importance of dynamic topography and Andean orogeny on Amazon landscape evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 546, 116423. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116423>
- Cáceres, A. L. (2016). *Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima* (Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)). Retrieved from <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6682>
- Calderón, M. A. (2013). *Prefabricación y Vivienda de Emergencia. Estudio Comparativo de*

- Sistemas Constructivos Industrializados Utilizados en Viviendas Temporales Post-Desastre. Caso Haití (2010).* (Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19614/1/ManuelAriel_TFM.pdf
- Casa abierta. (2018). Dymaxion Deployment Unit. Retrieved July 12, 2021, from <https://casa-abierta.com/post.php?t=591065238dc7c>
- Cederberg, C., & Stadig, M. (2003). System Expansion and Allocation in Life Cycle Assessment of Milk and Beef Production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 350–356. <https://doi.org/10.1007/BF02978508>
- Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES). (2009). *Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao - Perú.*
- Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES). (2016). PERÚ: MAPA DE PELIGROS. Retrieved June 8, 2021, from <https://predes.org.pe/mapas/mapa-de-peligros/>
- Centro Nacional de Estimación Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2016). Misión y Funciones. Retrieved June 7, 2021, from <https://cenepred.gob.pe/web/mision-y-funciones/>
- Chamblas, Y. (2015). *Soluciones constructivas aplicadas en la provisión de viviendas de emergencia post desastre - 3 casos de estudio.* Universidad del Bío - Bío.
- Changnon, S. (2000). *El Niño 1997-1998: The Climate Event of the Century.* Nueva York: Oxford University Press, Inc.
- CML - Department of Industrial Ecology Leiden University. (2016). CML-IA Characterisation Factors - Leiden University. Retrieved October 2, 2021, from <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Concrete Canvas. (2012). *Concrete Canvas Shelters brochure* (p. 4). p. 4.
- Concrete Canvas. (2020). Concrete Canvas Shelters. Retrieved July 12, 2021, from <https://www.concretcanvas.com/es/cc-shelters/>

Congreso de la República. (2011). *Ley N° 29664 - Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)* (p. 21). p. 21.

Corzo, S. A. (2016). *Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en huancayo* (Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)). Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7402>

Crameri, F., Shephard, G. E., & Conrad, C. P. (2019). Plate tectonics. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12393-0>

DesInventar. (2020). DesInventar Disaster Information Management System. Retrieved October 21, 2021, from <https://db.desinventar.org/>

Dirección de Arquitectura - Ministerio de Obras públicas Gobierno de Chile (MOPCH). (2014). *Guía práctica para la vivienda de emergencia*. Retrieved from https://arquitectura.mop.gob.cl/emergencias/Documents/Guia_Practica_Vivienda_Emergencia.pdf

EcoInvent. (2013). About Ecoinvent. Retrieved June 29, 2021, from <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>

EcoInvent. (2015a). Allocation at the Point of Substitution. Retrieved July 15, 2021, from <https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/apos-system-model/allocation-at-the-point-of-substitution.html>

EcoInvent. (2015b). System Models in ecoinvent 3. Retrieved July 15, 2021, from <https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/system-models-in-ecoinvent-3.html>

EcoInvent. (2021a). About ecoinvent. Retrieved September 21, 2021, from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/>

EcoInvent. (2021b). History. Retrieved September 21, 2021, from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/history/>

- EcoInvent. (2021c). Structure Overview. Retrieved September 21, 2021, from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/structure-overview/>
- EcoInvent. (2021d). System Models. Retrieved September 21, 2021, from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- El Comercio. (2013, August 15). *Terremoto en Ica: seis años después unas 14000 familias aún duermen en carpas*. Retrieved from <https://elcomercio.pe/sociedad/lima/terremoto-ica-seis-anos-despues-unas-14000-familias-aun-duermen-carpas-noticia-1617797/?ref=ecr>
- El Comercio. (2015a, March 23). *Huaico en Chosica: lluvias y deslizamientos inundan las calles*. Retrieved from <https://elcomercio.pe/lima/huaico-chosica-lluvias-deslizamientos-inundan-calles-345693-noticia/?ref=ecr>
- El Comercio. (2015b, March 25). *Huaico en Chosica: zona fue declarada en emergencia por 60 días*. Retrieved from <https://elcomercio.pe/lima/huaico-chosica-zona-declarada-emergencia-60-dias-346075-noticia/?ref=ecr>
- El Comercio. (2016, February 28). *Vivir en las alturas*. Retrieved from <https://elcomercio.pe/eldominical/actualidad/vivir-alturas-392960-noticia/?foto=2>
- Eternit SA. (2017). *Guía práctica de montaje - Sistema Modular Prefabricado Moduplak*. Lima.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (EC-JRC-IES). (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. <https://doi.org/10.2788/38479>
- French, A., Mechler, R., Arestegui, M., MacClune, K., & Cisneros, A. (2020). Root causes of recurrent catastrophe: The political ecology of El Niño-related disasters in Peru. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101539>
- Galerie Patrick Seguin. (2019). Jean Prouvé - 6x6 demountable house, 1944. Retrieved July 12, 2021, from <https://www.patrickseguin.com/en/designers/architect-jean-prouve/available-houses-jean-prouve/6x6-demountable-house-1944/>

- García-Torres, S. (2014). *Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar* (Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)). Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5313>
- García, A., & Navarro, J. (2012). Life Cycle Assessments of Three Dwellings in Andalusia (Spain): the Significance of the Regional Context. *Mokslas - Lietuvos Ateitis*, 4(2), 106–112. <https://doi.org/10.3846/mla.2012.22>
- Gestión. (2017, March 17). *¿Cuántas viviendas son producto de la autoconstrucción y qué riesgos enfrentan?* Retrieved from <https://gestion.pe/tu-dinero/inmobiliarias/viviendas-son-producto-autoconstruccion-riesgos-enfrentan-131042-noticia/>
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*. PRé.
- Haque, N. (2020). The life cycle assessment of various energy technologies. In *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet* (pp. 633–647). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00029-3>
- Heijungs, R., Goedkoop, M., Huijbregts, M., De Schryver, A., & Strujis, J. (2013). Introduction. In *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I Characterization* (pp. 1–3).
- Heijungs, R., Huijbregts, M., & Goedkoop, M. (2013). Overall architecture. In *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I Characterization* (pp. 4–20).
- Heijungs, R., Udo de Haes, H. A., White, P., & Golden, J. (2008a). *LCA (Life Cycle Assessment) Training Kit Material - Module B: Overview of LCA* (p. 39). p. 39. Life Cycle Initiative.
- Heijungs, R., Udo de Haes, H. A., White, P., & Golden, J. (2008b). *LCA (Life Cycle Assessment) Training Kit Material - Module D: Inventory analysis* (p. 31). p. 31. Life Cycle Initiative.
- Heijungs, R., Udo de Haes, H. A., White, P., & Golden, J. (2008c). *LCA (Life Cycle Assessment) Training Kit Material - Module E: Impact assessment* (p. 34). p. 34. Life Cycle Initiative.

- Heijungs, R., Udo de Haes, H. A., White, P., & Golden, J. (2008d). *LCA (Life Cycle Assessment) Training Kit Material - Module F: Interpretation* (p. 44). p. 44. Life Cycle Initiative.
- Hosseini, S. M. A., Farahzadi, L., & Pons, O. (2021). Assessing the sustainability index of different post-disaster temporary housing unit configuration types. *Journal of Building Engineering*, 42, 1–52. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102806>
- Infabrikaren SAC. (2017a). *Especificaciones técnicas MTVI Costa*. Lima.
- Infabrikaren SAC. (2017b). *Manual de instalación MTVI Costa*. Lima.
- Infabrikaren SAC. (2017c). *Planos A01-06 IE01-02 MTVI Costa*. Lima.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2004). *Plan nacional de prevención y atención de desastres*.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2006). Manual Básico Para La Estimación Del Riesgo. *Indeci*, 319, 75. Retrieved from http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319_contenido.pdf
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2008). *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2007*. Lima.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2020a). ¿Qué hacemos? Retrieved June 7, 2021, from <https://www.gob.pe/4126-instituto-nacional-de-defensa-civil-que-hacemos>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2020b). Organización de Instituto Nacional de Defensa Civil. Retrieved June 7, 2021, from <https://www.gob.pe/9984-instituto-nacional-de-defensa-civil-organizacion-de-instituto-nacional-de-defensa-civil>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2011). *Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima metropolitana y Callao*. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). *Peru: Perfil sociodemográfico. Informe nacional. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Lima.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2019). *Producto bruto interno por departamentos*. Retrieved from http://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/pbi_departamental2018.pdf
- International organization for standardization (ISO). (2006a). *14040: Environmental management—life cycle assessment—Principles and framework*.
- International organization for standardization (ISO). (2006b). *14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7555.1418>
- Kuroiwa, J. (2002). *Reducción de desastres* (Vol. 0). Lima.
- Kylili, A., Ilic, M., & Fokaides, P. A. (2017). Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. *Resources, Conservation and Recycling*, *116*, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.010>
- La República. (2013, May 2). *El 60% de las viviendas en el Perú se edifican con la autoconstrucción*. Retrieved from <https://larepublica.pe/economia/708521-el-60-de-las-viviendas-en-el-peru-se-edifican-con-la-autoconstruccion/>
- Lambert, R. (2021). The violence of planning law and the production of risk in Lima. *Geoforum*, *122*(October 2019), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.03.012>
- Li, P., & Froese, T. M. (2016). Life-Cycle Assessment of High Performance, Low Cost Homes. *Procedia Engineering*, *145*, 1322–1329. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.170>
- Liguori, N., Tarque, N., Bambarén, C., Spacone, E., Viveen, W., & de Filippo, G. (2019). Hospital treatment capacity in case of seismic scenario in the Lima Metropolitan area, Peru. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *38*(May), 101196. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101196>
- Mannheim, V., Fehér, Z. S., & Siménfalvi, Z. (2019). Innovative solutions for the building industry to improve sustainability performance with life cycle assessment modelling. In *Solutions for Sustainable Development* (p. 9). <https://doi.org/10.1201/9780367824037-31>

- Milousi, M. (2018). *Stochastic Life Cycle Assessment and Cost analysis in Renewable Energy Systems*. Technical University of Crete.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2017). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético - Sector Residencial* (p. 75). p. 75. Retrieved from <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia Sector Residencial.pdf>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2010). *Edificaciones antisísmicas de Adobe*. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj0__ebkIPuAhWyBtQKHQcZCxsQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fwww3.vivienda.gob.pe%2Fdnc%2Farchivos%2FEstudios_Normalizacion%2FManuales_guias%2FMANUAL%2520ADOBE.pdf&usg=AOvVaw21_LgSCwEeHq
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2017). *Exposición Reconstrucción Con Cambios*. Retrieved from https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2017/CEProcesoReconstruccionFenomeno/files/reconstrucción_exposición_ministro_de_vivienda_18_ago_2017.pdf?fbclid=IwAR2icJs8jQdevN77-wYDzL0aSzO2BX-rV6e0O2vKw0pO3CkISTEg0lzLZ6Y
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2020). PERÚ: Evolución Mensual de la Actividad del Sector Construcción (PBI de Construcción): 2014 - 2020. Retrieved June 15, 2021, from http://www3.vivienda.gob.pe/Destacados/estadistica/62_PBI-CONSTRUCCION.pdf
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). *Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao* (p. 97). p. 97. Retrieved from <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>
- Miranda Sara, L., Jameson, S., Pfeffer, K., & Baud, I. (2016). Risk perception: The social construction of spatial knowledge around climate change-related scenarios in Lima. *Habitat International*, 54, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.025>
- Misión de Naciones Unidas. (2014). *Análisis de la implementación de la Gestión del Riesgo de*

Desastres en el Perú. Retrieved from <http://onu.org.pe/wp-content/uploads/2014/08/Análisis-de-la-implementación-de-la-Gestión-del-Riesgo-de-Desastres-en-el-Perú.pdf>

Monteiro, H., Freire, F., & Soares, N. (2021). Life cycle assessment of a south European house addressing building design options for orientation, window sizing and building shape. *Journal of Building Engineering*, 39(February), 102276. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102276>

Muñoz, A. (2011). *Efecto del suelo en las demandas sísmicas. [Diapositivas] Material de enseñanza* (p. 14). p. 14. Lima.

Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Life Cycle Assessment. In *Environmental Management* (pp. 57–75). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>

National Research Council. (2014). Life Cycle, Performance, and Economic Considerations. In *A Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives* (pp. 135–148). Washington, D.C.

Observatorio vulcanológico del INGEMMET. (2012). Volcanes del Perú. Retrieved June 7, 2021, from http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=96

Organización Mundial de la Salud (OMS), & Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2009). Cantidad mínima de agua necesaria para uso doméstico. *Guías Técnicas Sobre Saneamiento, Agua y Salud (OMS/OPS)*, pp. 1–4. Retrieved from <http://www.disaster-info.net/Agua/pdf/9-UsoDomestico.pdf>

Parodi, E., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2021). Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru. *Climate Risk Management*, 33(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>

Pearce, F. (2017). The one-man environmental disaster. *New Scientist*, 234(3129), 42–43. [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(17\)31121-1](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(17)31121-1)

Pelletier, N., & Tyedmers, P. (2011). An ecological economic critique of the use of market information in life cycle assessment research. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 342–354. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00337.x>

- Petrovic, B., Myhren, J. A., Zhang, X., Wallhagen, M., & Eriksson, O. (2019). Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden. *Applied Energy*, 251(April), 113253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.056>
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2014, June). Curando grietas. *NEO*, pp. 2–12.
- PRé. (2019). *Simapro Database Manual*. Retrieved from <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>
- PRé. (2020a). About SimaPro. Retrieved June 29, 2021, from <https://simapro.com/about/>
- PRé. (2020b). *SimaPro (software)*. Retrieved from <https://simapro.com/>
- Romero, A. (2018). Herbert L. Needleman (1927-2017). *Environmental Research*, 165(November 2017), 507–509. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.048>
- RPP noticias. (2017, August 14). *Pisco: Las grietas de la reconstrucción*. Retrieved from <https://rpp.pe/politica/estado/las-grietas-de-la-reconstruccion-a-10-anos-del-terremoto-en-pisco-noticia-1070262?ref=rpp>
- Santa Cruz, S. (2011a). Estimación de vulnerabilidad físico-estructural en grandes ciudades. Retrieved June 7, 2021, from Blog de Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo website: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/ssantacruz/2011/11/04/estimacion-de-vulnerabilidad-fisico-estructural-en-grandes-ciudades/>
- Santa Cruz, S. (2011b). Mitigación integral en comunidades rurales del Perú. Retrieved October 21, 2021, from Blog de Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo website: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/ssantacruz/2011/08/30/mitigacion-integral-en-comunidades-rurales-del-peru/>
- Santa Cruz, S. (2011c). Reducción de la vulnerabilidad de las comunidades rurales del Perú. Retrieved June 7, 2021, from Blog de Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo website: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/ssantacruz/2011/08/30/reduccion-de-la-vulnerabilidad-de-las-comunidades-rurales-del-peru/>
- Santa Cruz, S. (2013). *Evaluación Probabilística del riesgo sísmico de escuelas y hospitales de*

la ciudad de Lima. Componente 2: Evaluación probabilística del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de Lima.

Santa Cruz, S. (2014). Lecciones Aprendidas: Infraestructura de locales escolares. Retrieved June 8, 2021, from Blog de Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo website:
<http://blog.pucp.edu.pe/blog/ssantacruz/2014/05/12/lecciones-aprendidas-infraestructura-de-locales-escolares/>

Seike, T., Isobe, T., Hosaka, Y., Kim, Y., Watanabe, S., & Shimura, M. (2019). Design and supply system for emergency temporary housing by various construction methods from the perspective of environmental impact assessment: The case for the Great East Japan earthquake. *Energy and Buildings*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109425>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. (2014). *El fenómeno el niño en el Perú*. Lima.

Shelter Centre. (2012). *Transitional shelter guidelines*. Shelter Centre.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2016). Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments. *Building and Environment*, 103, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & Moya, L. (2020). Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage. *Journal of Cleaner Production*, 277, 121958.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121958>

Sphera Solutions. (2021). GaBi Product Sustainability Software. Retrieved October 2, 2021, from <https://gabi.sphera.com/international/software/gabi-software/gabi/>

Stephenson, W. R. B., Benites, R. A., & Davenport, P. N. (2009). Localised coherent response of the La Molina basin (Lima, Peru) to earthquakes, and future approaches suggested by Parkway basin (New Zealand) experience. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(10), 1347–1357. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.05.002>

SwissRe. (2008). Natural catastrophes and man-made disasters in 2007: High losses in Europe.

Sigma, 1(1), 1–48.

- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson Educación SA.
- Tecnopanel SA. (2014a). *Especificaciones tecnicas Viviendas de Emergencia ONEMI (18m2)*.
- Tecnopanel SA. (2014b). *Vivienda Emergencia 1 piso - ONEMI Módulo tipo A - 18 m2*.
- Termocret LTDA. (2011). *Manual de instalación Panel Estructural Termosip* (p. 36). p. 36.
- Trabucco, D., & Wood, A. (2016). LCA of tall buildings: Still a long way to go. *Journal of Building Engineering*, 7, 379–381. <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.07.009>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020). Gasoline explained. Gasoline and the environment. Retrieved June 15, 2021, from <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/gasoline-and-the-environment.php>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Ohio.
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2018). *United Nations Disaster Assessment and Coordination UNDAC Field Handbook*. Retrieved from https://www.unocha.org/sites/unocha/files/1823826E_web_pages.pdf
- United States Agency for International Development (USAID). (2016). *Construcción de Módulo de Vivienda Temporal con revestimiento de plástico*. Retrieved from https://www.sheltercluster.org/sites/default/files/docs/5_peru_consorcio_construccion_mtv_plastico_reforzado.pdf
- United States Geological Survey (USGS). (2007). M 8.0 - near the coast of central Peru. Retrieved June 7, 2021, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000fjta/executive>
- United States Geological Survey (USGS). (2017). 1906 San Francisco Earthquake. Retrieved July 12, 2021, from <https://usgs.libguides.com/1906/earthquake>
- United States Geological Survey (USGS). (2018a). M 7.9 - The 1906 San Francisco Earthquake.

Retrieved July 12, 2021, from

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/iscgem16957905/executive>

United States Geological Survey (USGS). (2018b). Moment magnitude, Richter scale - what are the different magnitude scales, and why are there so many? Retrieved December 6, 2021, from <https://www.usgs.gov/faqs/moment-magnitude-richter-scale-what-are-different-magnitude-scales-and-why-are-there-so-many?>

Vázquez-Rowe, I. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental - Gestión ambiental [Diapositivas] Material de enseñanza* (p. 73). p. 73. Lima.

Vázquez-Rowe, I., Córdova-Arias, C., Brioso, X., & Santa-Cruz, S. (2021). A method to include life cycle assessment results in choosing by advantage (Cba) multicriteria decision analysis. a case study for seismic retrofit in peruvian primary schools. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(15), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su13158139>

Villar-Vega, M., & Silva, V. (2017). Assessment of earthquake damage considering the characteristics of past events in South America. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *99*(May), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.004>

Wind Energy - The Facts. (2009). Impact categories. Retrieved September 21, 2021, from <https://www.wind-energy-the-facts.org/impact-categories.html>

Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, *44*(12), 2510–2520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>

8. Anexos

Anexo A: Descripción detallada y esquema de viviendas seleccionadas para el ACV



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS
DE VIVIENDA PROVISORIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO
DE VIDA (ANEXOS)**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Ayrton Enrique Gómez Alarcón

ASESOR:

Ian Vázquez Rowe

Lima, diciembre, 2021

Índice

Índice	I
Lista de figuras	II
Anexo A: Descripción detallada y esquema de viviendas seleccionadas para el ACV	III
A.1 Modelo 1 – madera machihembrada.....	III
A.2 Modelo 2 – paneles <i>superboard</i>	IX
A.3 Modelo 3 – paneles SIP OSB.....	XIV



Lista de figuras

Figura I: Vista frontal – modelo 1	III
Figura II: Distribución de ambientes interiores – modelo 1	IV
Figura III: Paneles para muro en corte lateral – modelo 1	V
Figura IV: Vista en planta de vigas para piso – modelo 1	VI
Figura V: Apoyos de madera para cimentación – modelo 1	VI
Figura VI: Vista isométrica de viga central y muros – modelo 1	VII
Figura VII: Isometría de circuito de iluminación – modelo 1	VIII
Figura VIII: Vivienda instalada – modelo 2.....	IX
Figura IX: Distribución de ambientes interiores – modelo 2	X
Figura X: Marcos de madera de paneles para muros – modelo 2.....	XI
Figura XI: Proceso de instalación de plataformas para piso – modelo 2.....	XI
Figura XII: Detalle de viga y pilares de cimentación – modelo 2.....	XII
Figura XIII: Vista isométrica de correas centrales y muros – modelo 2.....	XIII
Figura XIV: Isometría de vivienda instalada – modelo 3.....	XIV
Figura XV: Paneles SIP OSB – modelo 3	XV
Figura XVI: Estructura de dos pisos construida con paneles SIP	XVI
Figura XVII: Detalle de clavija OSB para unión de paneles – modelo 3.....	XVII
Figura XVIII: Detalle de paneles de muros unidos a soleras de piso y techo – modelo 3.....	XVII
Figura XIX: Planta de envigado 2x3” – modelo 3	XVIII
Figura XX: Isometría de viga principal – modelo 3	XIX
Figura XXI: Detalle de encuentro de paneles para muro y techo – modelo 3.....	XIX

Anexo A: Descripción detallada y esquema de viviendas seleccionadas para el ACV

A.1 Modelo 1 – madera machihembrada

La vivienda correspondiente al modelo 1 fue diseñada por la empresa privada Infabrikaren SAC. Este diseño resultó ganador de un concurso público organizado por el MVCS, quedando seleccionado para su fabricación e implementación durante la etapa de rehabilitación de damnificados por El Niño costero de 2017, específicamente en la provincia de Ascope, en el departamento de La Libertad (MVCS, 2017). La siguiente información referente a materiales, medidas y demás características del proyecto fue obtenida de la documentación presentada por la empresa para el concurso público mencionado, es decir, planos, especificaciones técnicas y manual de instalación (Infabrikaren SAC, 2017c, 2017b, 2017a).

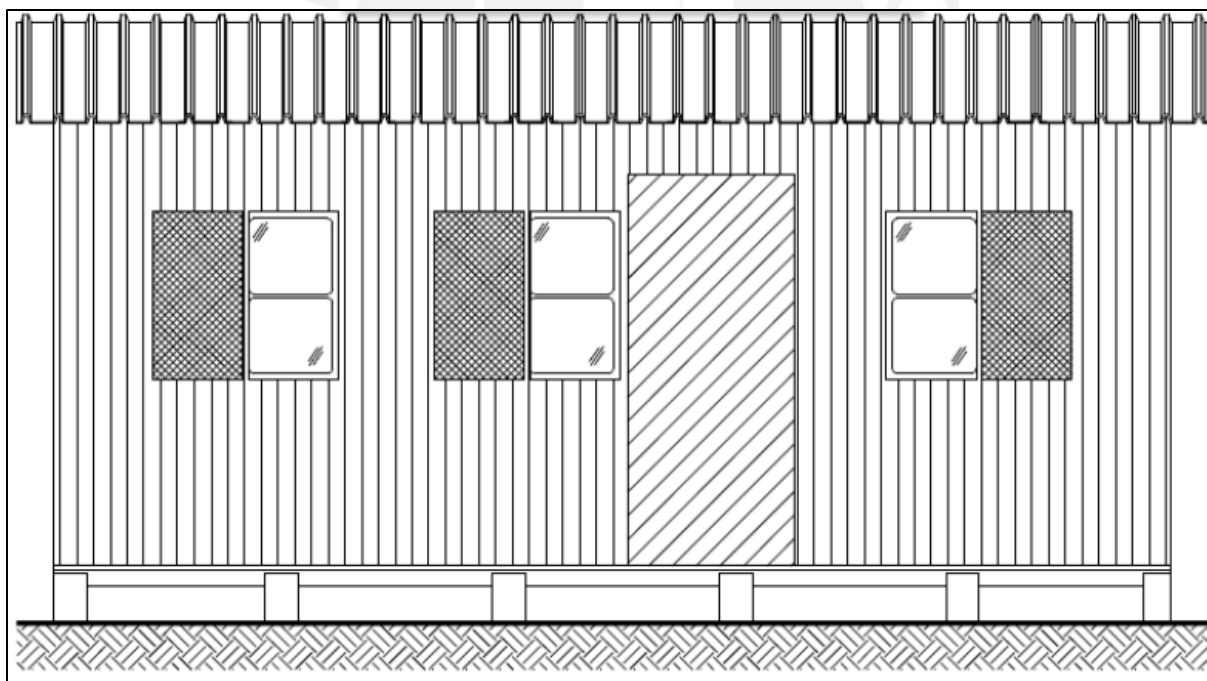


Figura I: Vista frontal – modelo 1

Fuente: Tomado de Infabrikaren SAC, 2017b

La planta del modelo 1 es rectangular de 6,00 metros de largo y 3,00 de ancho, es decir, 18,00 m² de área, la cual se divide en tres ambientes. El techo tiene pendiente en el sentido corto para drenar las aguas pluviales, por lo que la pared posterior tiene una altura de 2,90 m, que se reduce a 2,40 m para la pared frontal.

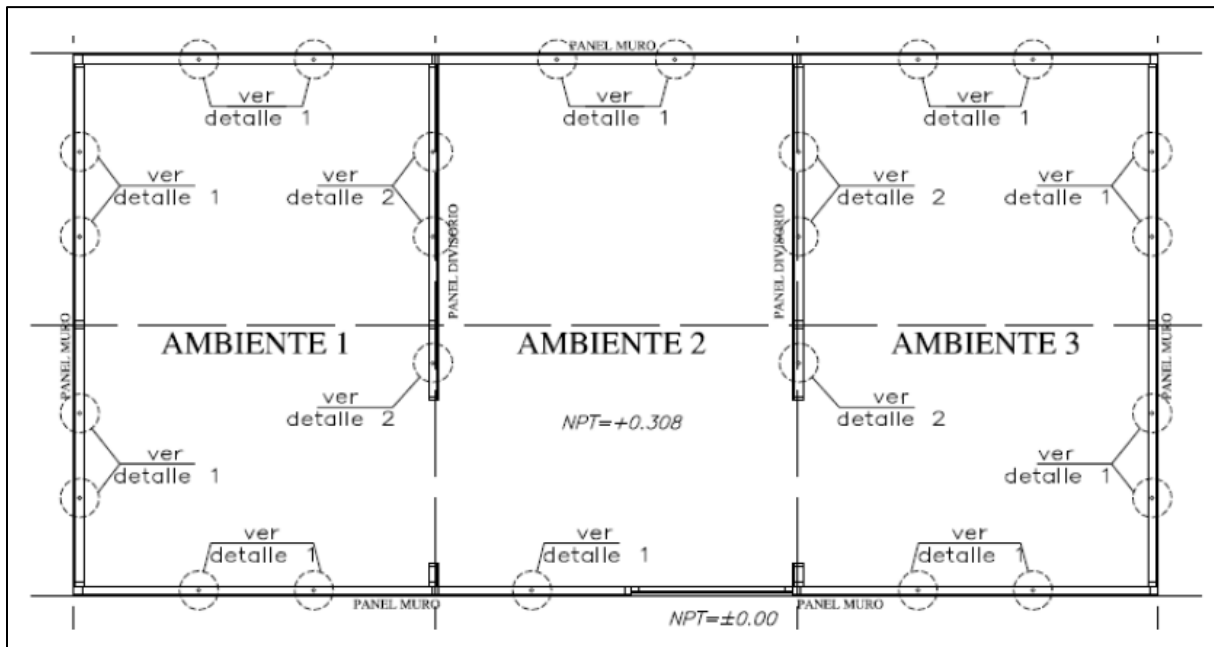


Figura II: Distribución de ambientes interiores – modelo 1

Fuente: Tomado de Infabrikaren SAC, 2017b

Las paredes de esta vivienda están formadas por paneles estructurales con marco de madera capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y cobertura de madera machihembrada bolaina (*Guazuma crinita*). Estos paneles tienen dimensiones típicas 2,00x2,90 m y 2,00x2,40 m para la fachada posterior y frontal, respectivamente, además de paneles trapezoidales de 1,45 m de ancho y altura variable para muros laterales y tabiques interiores. Los vanos para puertas y ventanas están incluidos en la prefabricación de los paneles de muros, así como la fijación entre elementos del marco, cuyas dimensiones típicas son 4,50x2,00 cm, y la fijación entre este y los listones de 9,00x1,00 cm que componen la cobertura.

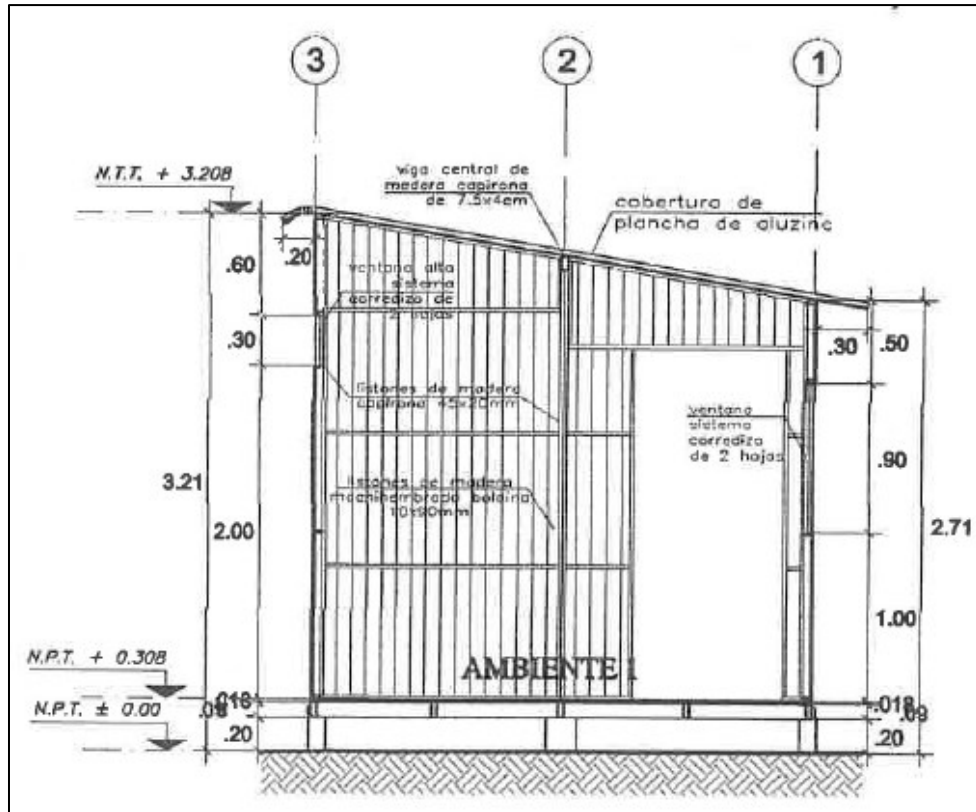


Figura III: Paneles para muro en corte lateral – modelo 1

Fuente: Tomado de Infabrikaren SAC, 2017c

Los paneles para muros se apoyan sobre un sistema de vigas para piso de madera capirona y con sección transversal típica de 3,50x9,00 cm con separaciones de 0,75, 1,05 y 1,15 m. Los marcos rectangulares resultantes son cubiertos por tableros de *triplay* fenólico de 18 mm de espesor, en su mayoría de 1,22x3,00 m.

Para el techo se ha especificado una viga principal longitudinal de madera capirona de 7,50x4,00 cm que debe empalmarse en obra a partir de tres secciones, dos tramos de 2.00 m y uno de 2.35 m. Esta viga es proporcionada en secciones para facilitar su transporte terrestre a través de tráileres. Para el cerramiento del techo se usan planchas metálicas de 1,26x3,70 m con recubrimiento de aluminio-zinc, las cuales se fijan a los bordes superiores de los muros y a la viga central mediante pernos.



Figura VI: Vista isométrica de viga central y muros – modelo 1

Fuente: Tomado de Infabrikaren SAC, 2017a

La puerta principal mide 0,90x2,10 m y está hecha del mismo material que los paneles de muros, es decir, bastidores de madera capirona y cobertura de madera machihembrada bolaina. No se incluyen puertas para los ambientes interiores, pero sí los vanos para su futura instalación. Las ventanas bajas son tres, miden 1,00x0,90 m y están ubicadas en la pared frontal, repartidas una

para cada ambiente. Por otro lado, las ventanas altas son dos, miden 1,00x0,30 m y están ubicadas en los ambientes laterales. miden 1,00x0,30 m. En ambos casos se indica vidrio crudo de 3 mm de espesor y sistema corredizo, además de la instalación de malla mosquitera.

Las instalaciones eléctricas incluyen, para cada uno de los tres ambientes, un punto de luz, interruptor y tomacorriente, además de un tablero eléctrico con tres interruptores termomagnéticos y un interruptor diferencial ubicado en el ambiente central. Todos cables son conducidos a través de canaletas adosadas a los muros. Los focos son instalados a lo largo de la viga central.

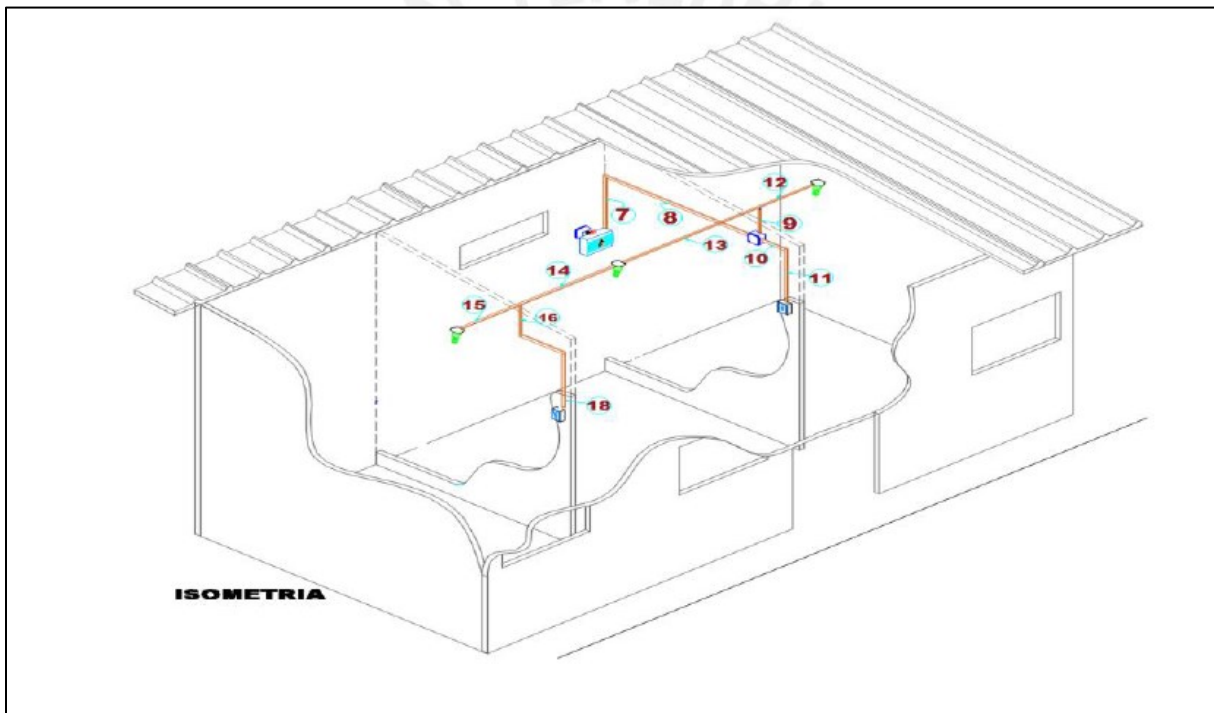


Figura VII: Isometría de circuito de iluminación – modelo 1

Fuente: Tomado de Infabrikaren SAC, 2017b

Para prevenir el desgaste de la vivienda, los apoyos de madera son recubiertos con alquitrán en la altura enterrada para evitar el pudrimiento. Además, en la fábrica se da tratamiento con preservante de madera, seguido de una capa de pintura y otra de retardante al fuego a paneles de piso y muros.

A.2 Modelo 2 – paneles *superboard*

La vivienda correspondiente al modelo 2 fue diseñada por la empresa privada Fca Peruana Eternit SA (Eternit SA). Al igual que el modelo 1, este diseño resultó ganador de un concurso público organizado por el MVCS, en el marco de la rehabilitación de damnificados por El Niño costero de 2017. Estas viviendas fueron destinadas para los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Ancash y Lima (MVCS, 2017). La información del proyecto fue obtenida del principalmente del manual de instalación, que incluye cantidades, medidas y esquemas de los materiales y elementos usados (Eternit SA, 2017).



Figura VIII: Vivienda instalada – modelo 2

Fuente: Tomado de Eternit SA, 2017

La planta del modelo 2 es rectangular de 7,48 metros de largo y 2,52 de ancho, es decir, 18,85 m² de área, la cual se divide en tres ambientes. Similarmente al modelo 1, el techo tiene pendiente en el sentido corto para drenar las aguas pluviales, por lo que la pared posterior tiene una altura de 3,05 m, que se reduce a 2,44 m para la pared frontal.

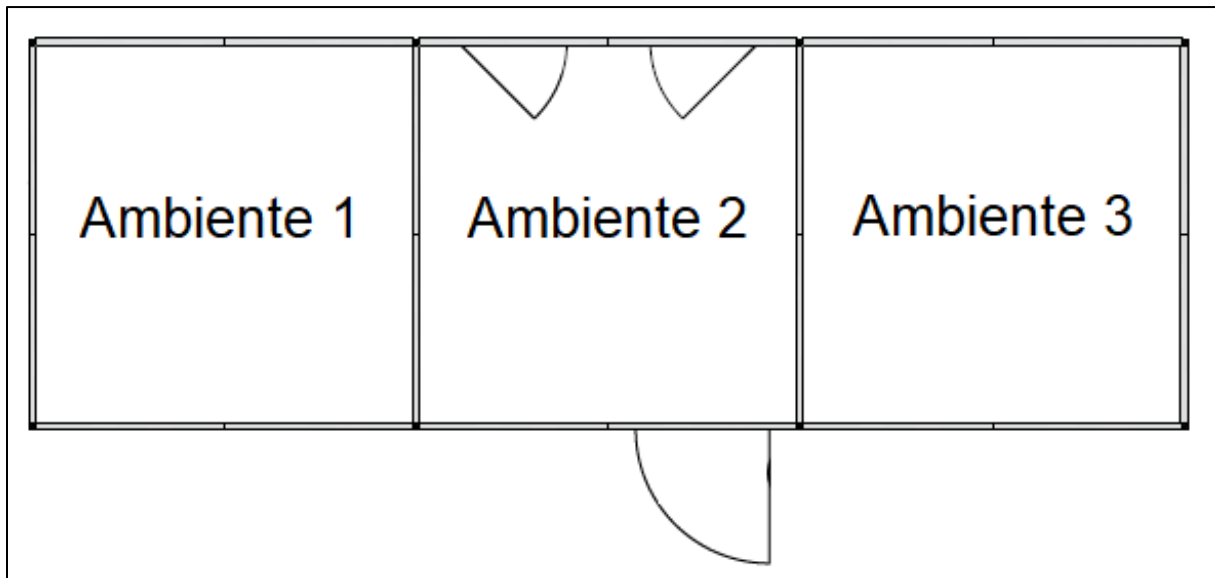


Figura IX: Distribución de ambientes interiores – modelo 2

Fuente: Adaptado de Eternit SA, 2017

Las paredes de esta vivienda están formadas por paneles estructurales con marco de madera pino radiata y cobertura de planchas de fibrocemento de 6 mm de espesor, cuyo nombre comercial es *superboard*. Estos paneles tienen dimensiones típicas 1,22x2,44 m para todos los muros. El desnivel se consigue gracias al uso de paneles tímpano de 1,22x0,61 m instalados sobre el muro posterior. Los vanos para puertas y ventanas están incluidos en la prefabricación de los paneles de muros, así como la fijación entre los elementos del marco, cuyas dimensiones típicas son 4,00x4,00 cm, y entre este y las planchas de *superboard* que componen la cobertura.

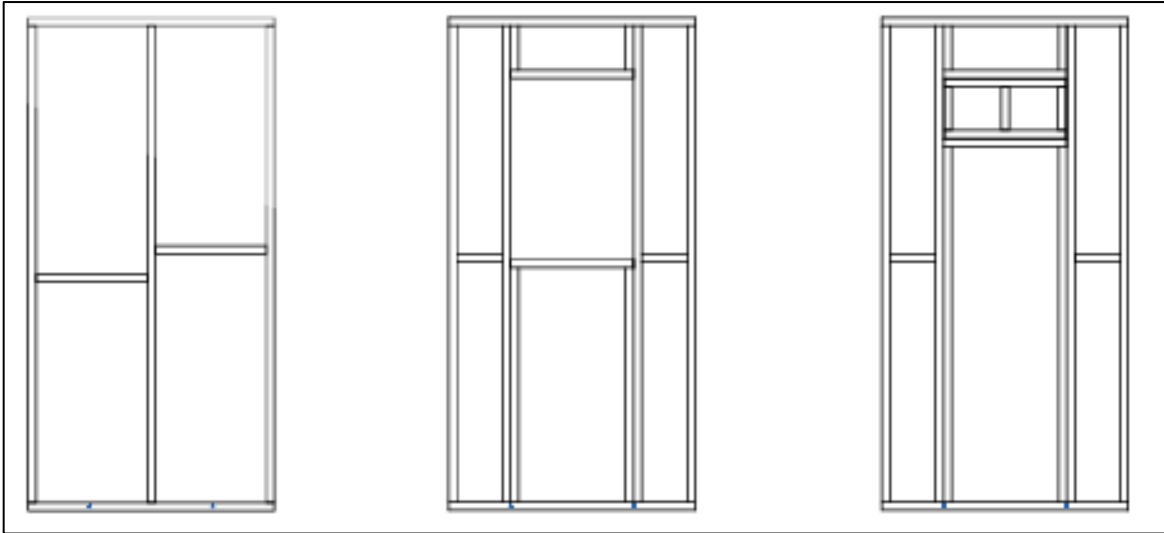


Figura X: Marcos de madera de paneles para muros – modelo 2

Fuente: Adaptado de Eternit SA, 2017

Los paneles para muros se apoyan sobre un sistema de vigas para piso de madera pino amarillo. Se distinguen las vigas principales de 4,00x15,00 cm a lo largo de todo el perímetro, que cuentan con pestañas interiores para soportar los paneles de piso de sección transversal típica de 4,00x9,00 cm y tienen separaciones de 0,61 y 1,22 m. Estos paneles son a su vez cubiertos por tableros de *triplay* fenólico de 18 mm de espesor de 1,22x2,44 m.



Figura XI: Proceso de instalación de plataformas para piso – modelo 2

A su vez, las vigas de piso se apoyan sobre grupos de pilares cilíndricos de madera de 12 cm de diámetro y 25 cm de altura. Estas vigas son clavadas en sus extremos a los pilares para brindar estabilidad a la estructura. Asimismo, se deben colocar tableros de madera sobre cada grupo de pilares.

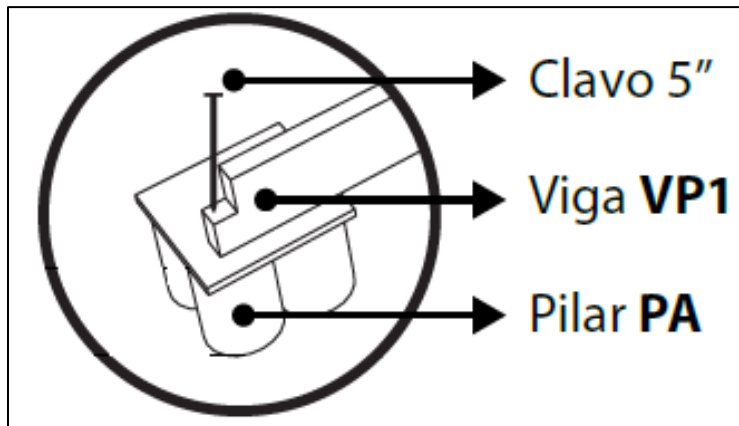


Figura XII: Detalle de viga y pilares de cimentación – modelo 2

Fuente: Adaptado de Eternit SA, 2017

Para el techo se ha especificado dos correas longitudinales de madera pino radiata de 7,00x4,00 cm que deben empalmarse en obra a partir de tres secciones. Al igual que en el caso del modelo 1, cada correa es proporcionada en secciones para facilitar su transporte. Con el fin de asegurar una correcta fijación se usan aberturas en los paneles cercha triangulares junto con estribos metálicos. Para el cerramiento del techo se emplean planchas onduladas de fibrocemento de 1,83x1,10 m, las cuales son fijadas a los bordes superiores de los muros y a las correas centrales usando pernos.

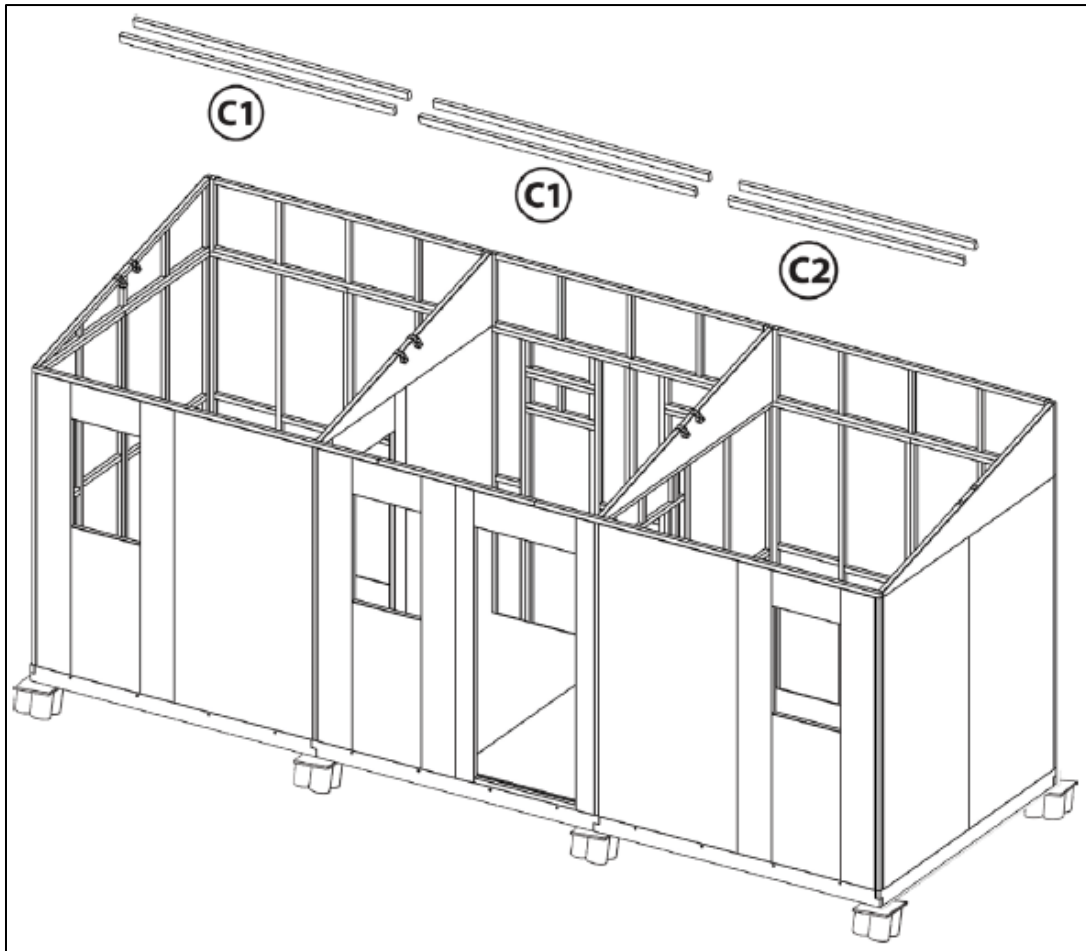


Figura XIII: Vista isométrica de correas centrales y muros – modelo 2

Fuente: Adaptado de Eternit SA, 2017

La puerta principal mide 0,90x2,10 m y está ubicada en el ambiente central. No se incluyen puertas para los ambientes interiores, solo sus vanos. Las ventanas bajas son tres y miden 0,60x0,90 m. Las ventanas altas, por su parte, son dos, miden 0,60x0,30 m y están ubicadas en el ambiente central. Estas tienen la peculiaridad de estar hechas del mismo material que los paneles, es decir, marco de madera cubierto con *superboard*.

Para prolongar la vida útil de la vivienda, se incluyen las pinturas como parte del kit de instalación, las cuales son aplicadas en obra. La madera de los apoyos recibe tratamiento inmunizante de fábrica.

A.3 Modelo 3 – paneles SIP OSB

La vivienda correspondiente al modelo 3 fue diseñada por la empresa privada TecnoPanel SA. Este diseño fue usado por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile (ONEMI), en el marco de la rehabilitación de damnificados por el terremoto de Iquique y el Gran incendio de Valparaíso de 2014 (MOPCH, 2014). La información del proyecto se extrajo de sus planos y especificaciones técnicas (TecnoPanel SA, 2014b, 2014a).

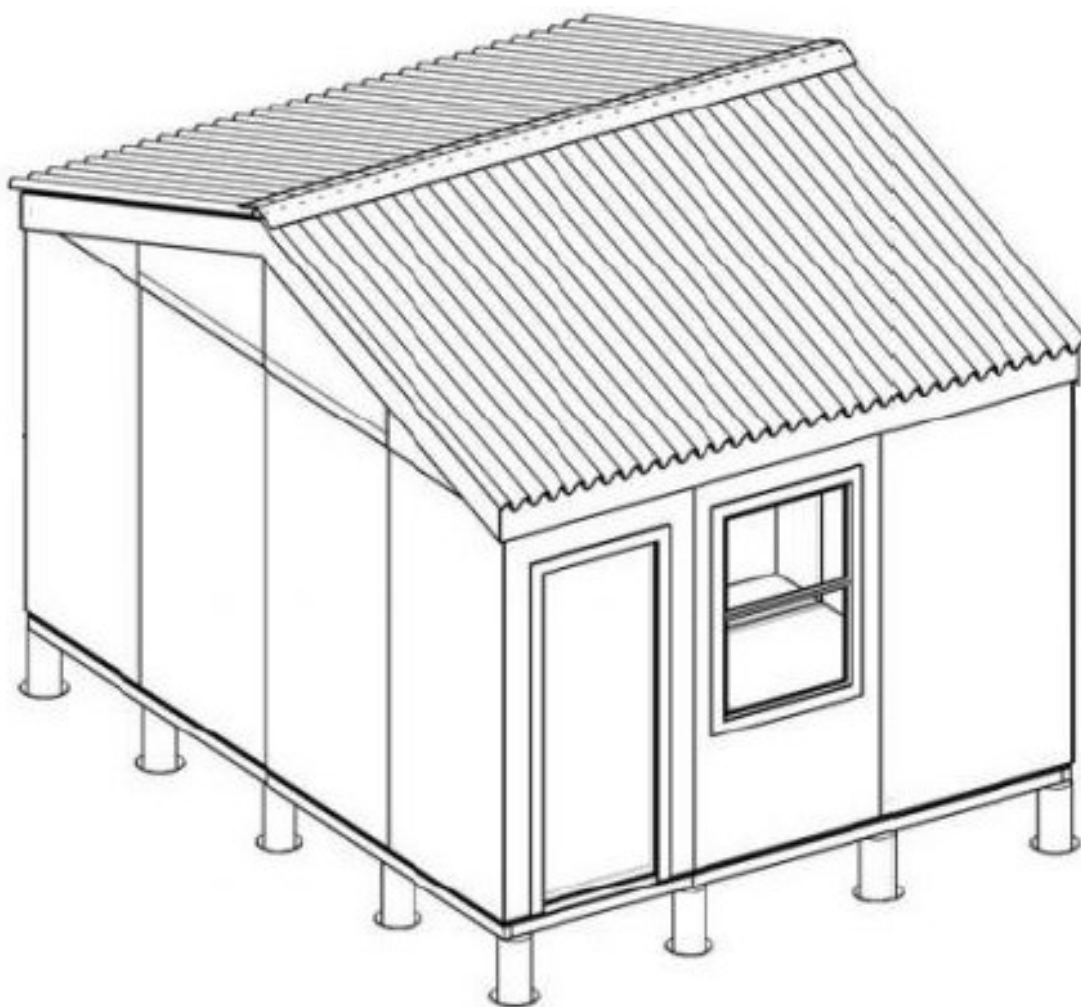


Figura XIV: Isometría de vivienda instalada – modelo 3

Fuente: Adaptado de Chamblas, 2015

A diferencia de los modelos anteriores, esta vivienda se caracteriza por estar orientada con su lado más corto hacia la fachada y por tener techo a dos aguas. Su planta es rectangular de 3,68x4,70 m, generando un área de 17,30 m². El techo alcanza una altura de 3,20 m en su punto más alto y que desciende hasta 2,44 m en el muro frontal y en el posterior.

Las paredes de esta vivienda están formadas por paneles SIP (*Structural Insulated Panel*), que son combinación de una plancha de poliestireno expandido (EPS), que funciona como núcleo, unida a tableros de virutas de madera orientada (OSB) en ambas caras. Esta disposición de elementos optimiza las propiedades resistentes de la sección de un tablero SIP frente a flexión. Dicha característica permite que, dado el suficiente espesor de EPS, los tableros SIP sean usados en losas de piso, techo e incluso entrepiso (Termocret, 2011).



Figura XV: Paneles SIP OSB – modelo 3

Fuente: Tomado de Termocret, 2011



Figura XVI: Estructura de dos pisos construida con paneles SIP

Fuente: Tomado de Termocret, 2011

Para el modelo 3, los paneles usan dos caras OSB de 9,5 mm de espesor y un núcleo de EPS de 15 kg/m³ de densidad y 56 mm de espesor. Estos paneles se usan como losas de piso, muros y techos. La única excepción se da en las paredes, cuya cara exterior de OSB es ligeramente más gruesa con 11,1 mm de espesor. Los paneles de muros típicos miden 1,22x2,44 m y se unen entre sí por medio de clavijas OSB que se colocan verticalmente y bajo cada una de las dos caras de OSB. Esto se consigue gracias a rebajes en el núcleo de EPS que son incluidos en el proceso de prefabricación. Los muros se fijan al piso clavándolos a vigas soleras de madera pino radiata de 5,4x4,1 cm. Estas soleras también se colocan a lo largo de todo el perímetro superior.

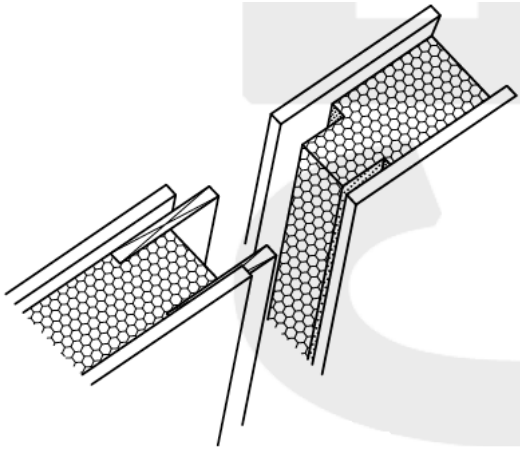


Figura XVII: Detalle de clavija OSB para unión de paneles – modelo 3

Fuente: Tomado de Termocret, 2011

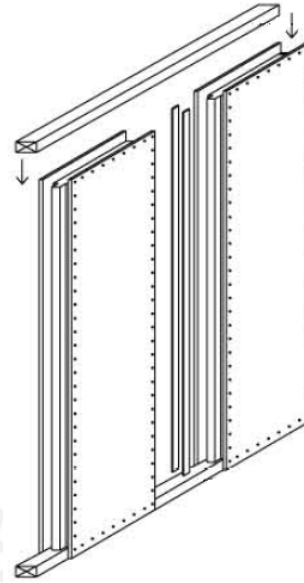


Figura XVIII: Detalle de paneles de muros unidos a soleras de piso y techo – modelo 3

Fuente: Adaptado de Tecnopanel SA, 2014b

Para el piso se usa un envigado de madera pino radiata de 2x3” con separación típica de 1,17 m. Sobre las vigas van clavadas las losas de piso que son paneles SIP de 1,22x2,34 m. Para la cimentación se emplean pilares cilíndricos de diámetro 7” y altura 75 cm.

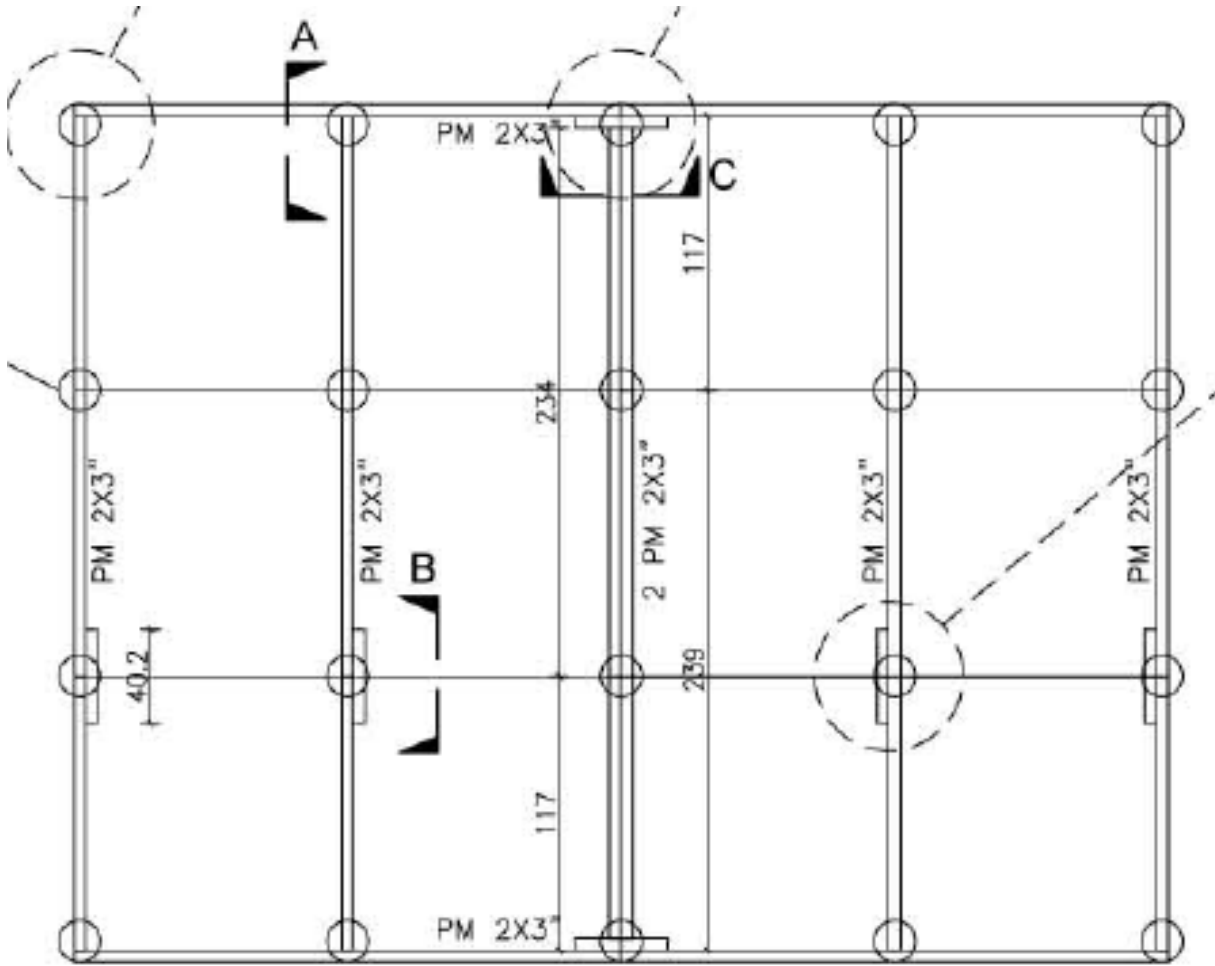


Figura XIX: Planta de envigado 2x3'' – modelo 3

Fuente: Adaptado de Tecnopanel SA, 2014b

Para el techo se usa una viga principal de madera pino compuesta por dos piezas de 4,1x13,8 cm unidas lateralmente y fijadas en sus extremos mediante estribos metálicos. Sobre esta viga y los paneles de muros se colocan los paneles SIP de techo de 1,22x2,44 m. Para cubrir estos últimos se emplean planchas metálicas clavadas a los paneles.

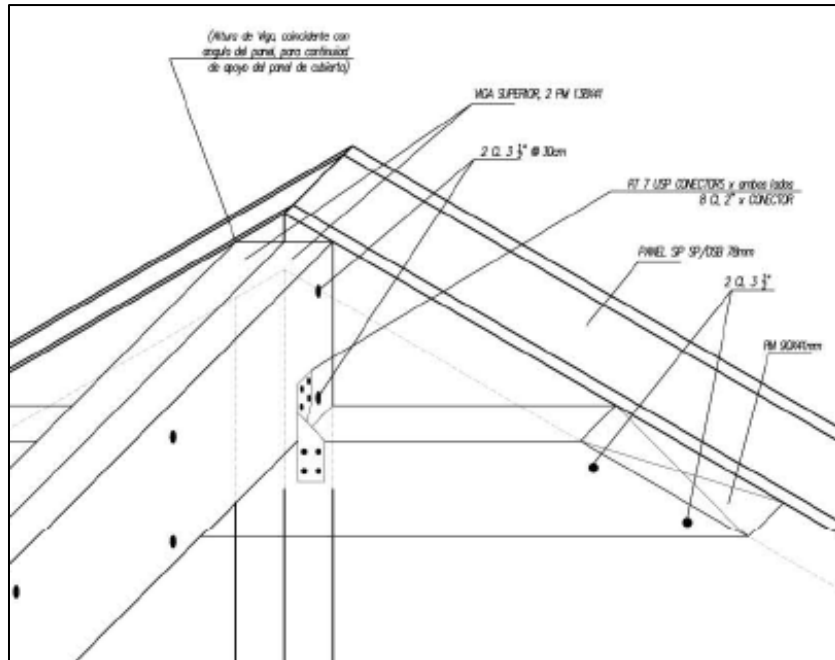


Figura XX: Isometría de viga principal – modelo 3

Fuente: Tomado de TecnoPanel SA, 2014b

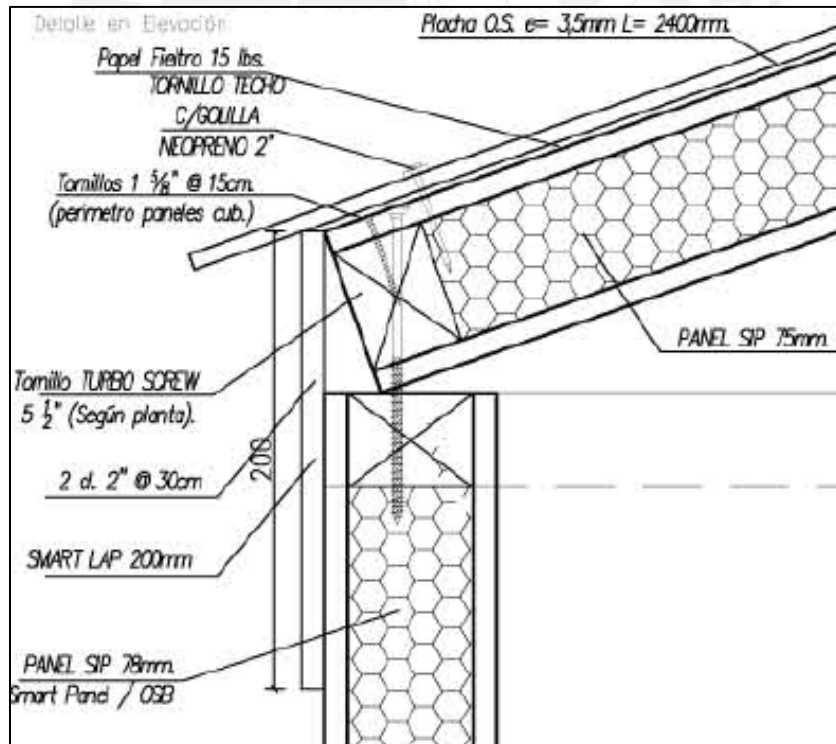


Figura XXI: Detalle de encuentro de paneles para muro y techo – modelo 3

Fuente: Tomado de TecnoPanel SA, 2014b

Una particularidad de este modelo es la incorporación de un pequeño baño de 1,10x1,83 m dentro de la vivienda. Este cuenta con lavamanos, inodoro, base para ducha y tuberías sobrepuestas a los paneles de muro. Asimismo, resalta el hecho de que, al comparar muros, pisos y techos de los tres modelos, los paneles SIP del modelo 3 ofrecen una capa adicional de recubrimiento frente a los paneles machihembrados y de *superboard* de los modelos 1 y 2, pues cuentan con tableros OSB en ambas caras. Para el caso particular de los techos la diferencia es incluso más pronunciada, pues si bien todos los modelos apoyan sus coberturas sobre vigas de forma similar, el modelo 3 complementa esto con otra capa de paneles SIP para completar el cerramiento de la vivienda. Esta provisión extra corresponde a las necesidades a cubrir según el contexto específico de Chile.

