



Maestría en Desarrollo Sustentable del Hábitat Humano

Trabajo Final Integrador

**ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO DE DOS
PROPUESTAS DE MEJORA EDILICIA PARA LA VIVIENDA
DEL CAMPAMENTO MALARGÜE DE LA DIRECCIÓN
NACIONAL DE VIALIDAD.**

Autor: Arq. Paulo PENICÓ AGUILAR

Directora: Dra. Ing. Paula Daniela RODRÍGUEZ

Mendoza, Argentina

Septiembre, 2022

RESUMEN

En este trabajo se compara el impacto potencial sobre el cambio climático de dos propuestas para la refuncionalización de la vivienda del Campamento Malargüe de la Dirección Nacional de Vialidad, considerando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) originadas durante la construcción y el uso. Las alternativas evaluadas comprenden variaciones en los materiales de la envolvente (muros, cubiertas y ventanas), seleccionados para integrar conceptos de ecodiseño edilicio. La primera de ellas consiste en la reparación de la vivienda y la segunda integra el uso de materiales que mejoren las características térmicas de la envolvente.

Se utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida y la unidad funcional definida fue “proveer resguardo para las personas, alcanzando una temperatura de confort térmico de 18 °C durante 25 años”.

Los resultados muestran que el impacto sobre el cambio climático para la primera mejora fue de 5041,32 kg CO₂ eq/UF y para la segunda, de 4683,64 kg CO₂ eq/UF. Si bien estos valores son cercanos, la contribución de cada etapa fue diametralmente opuesta. En la primera mejora, la etapa de uso reportó el 86 % de las emisiones, mientras que, en la segunda, la etapa de construcción representó el 98 % del impacto. En efecto, el impacto de la segunda alternativa durante la etapa de construcción fue casi siete veces mayor que el de la primera, como consecuencia de la adición de materiales. Los beneficios de esta mejora conllevan una reducción del requerimiento de energía para calefacción durante la etapa de uso, que se evidencia a partir del año 24, donde la segunda mejora comienza a comportarse como la mejor opción.

En conclusión, considerando que la vida útil de las edificaciones supera los 25 años, se recomienda la segunda mejora para la refacción de la vivienda estudiada.

PALABRAS CLAVE

Construcción de la envolvente, Ecodiseño Edilicio, Edificio Público, Análisis de Ciclo de Vida, Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Planteamiento del problema de origen	7
1.2. Objetivo general	9
1.3. Objetivos específicos	9
1.4. Hipótesis	10
2. METODOLOGÍA	11
2.1. Descripción del caso de estudio	11
2.2. Particularidades de las mejoras	13
2.3. Descripción de la metodología de análisis	14
2.4. Descripción de la Huella de Carbono (HC)	17
2.5. Aplicación de la metodología al caso de estudio.....	18
3. RESULTADOS	23
3.1. Resultados globales para las dos mejoras	23
3.2. Contribución al impacto sobre el cambio climático de cada entrada de inventario de la etapa de construcción	24
3.3. Contribución al impacto sobre el cambio climático de la etapa de uso	27
4. CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Unidad funcional, producto evaluado y etapas consideradas (límites del sistema)....	20
Tabla 1.2. Emisiones de GEI derivadas de la producción y combustión de GLP.....	21
Tabla 1.3. Inventario de ciclo de vida de etapa de construcción para la Mejora N° 1	22
Tabla 1.4. Inventario de ciclo de vida de etapa de construcción para la Mejora N°2	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la vivienda estudiada.....	11
Figura 2. Caso de estudio “Vivienda Campamento Malargüe”	12
Figura 3. Fases de un ACV	15
Figura 4. Contribución total y por etapa al impacto sobre el cambio climático para cada una de las mejoras evaluadas	23
Figura 5. Contribución de cada etapa al impacto sobre el cambio climático, comparando las dos mejoras	24
Figura 6. Contribución por elemento constructivo al impacto sobre el cambio climático para las dos mejoras (etapa construcción).....	25
Figura 7. Contribución al impacto sobre el cambio climático por cada entrada material de muros y cubiertas para las dos mejoras (etapa construcción).....	26
Figura 8. Contribución total al impacto a lo largo de la vida útil de las dos mejoras (etapa de uso).....	27

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
DNV	Dirección Nacional de Vialidad
DVH	Doble Vidrio Hermético
EPS	Poliestireno Expandido
FC	Factor(es) de Caracterización
GEI	Gas(es) de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
HC	Huella de Carbono
ICV	Inventario(s) de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NO ₂	Óxido nitroso
PVC	Policloruro de Vinilo
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
UF	Unidad Funcional

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema de origen

El cambio climático es sólo uno de los asuntos de interés ambiental -entre otros, como el adelgazamiento de la capa de ozono, la disponibilidad de agua, la disminución de las reservas de energía-, que producen preocupaciones en la sociedad porque repercuten en la salud humana y de los ecosistemas, y en las reservas de recursos naturales. Sin embargo, el cambio climático ocupa un lugar central en la agenda de los gobiernos y las organizaciones a nivel internacional dada su trascendencia global.

El cambio climático es una variación persistente del clima atribuida, directa o indirectamente, a la actividad humana durante períodos de tiempo comparables, y adicional a la variabilidad climática natural observada por cambios del equilibrio entre la energía solar entrante y la energía reemitida por la Tierra hacia el espacio. Se debe principalmente al aumento de la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero (GEI) por encima de los niveles naturales. Entre estos gases se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (NO₂) y el metano (CH₄), ya que tienen la propiedad de absorber y reemitir la radiación infrarroja que la Tierra recibe del sol. Gracias a ellos ocurre un fenómeno natural, conocido como efecto invernadero, que permite que la Tierra mantenga una temperatura promedio de 15 °C. Si no existiera este efecto, la temperatura promedio sería de -18 °C. Si bien algunos de estos gases se encuentran naturalmente en la atmósfera, otros son producidos por el ser humano (de origen antrópico) como resultado de actividades vinculadas a la generación de energía, el transporte, el uso del suelo, la industria, el manejo de los residuos, etc. La acumulación de estos gases en la atmósfera potencia el efecto invernadero natural y esto se traduce en aumento de la temperatura del planeta, que desencadena el cambio climático (Inventario Nacional de GEI Argentina, 2019).

Las consecuencias del cambio climático observadas a nivel global (escasez hídrica, aumento de los niveles oceánicos, extinción de especies, eventos climáticos extremos, etc.) han motivado el diseño y desarrollo de acciones que permitan mitigar el impacto negativo de las actividades antrópicas sobre el ambiente. En este marco, la Argentina firmó en el año 2015 el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático establecido por las

Naciones Unidas. El documento mencionado permite que cada país Parte del Acuerdo establezca a nivel nacional su contribución prevista, es decir, su objetivo de reducción de emisiones de GEI para alcanzar la meta global fijada. Argentina propone una mitigación incondicional consistente en reducir un 15% las emisiones del país de 2020 a 2030 (INDC, 2015).

Según el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en la República Argentina, el Sector de la Energía representa el 53 %, siendo el de mayor impacto. Dentro de este se ubica el subsector de la industria manufacturera y de la construcción, cuya contribución alcanza el 17 % (Inventario Nacional de GEI Argentina, 2019). En efecto, las prácticas actuales en el sector de la construcción dan como resultado un consumo de energía cada vez mayor, que se traduce en un aumento de las emisiones de GEI y en el agotamiento de los recursos naturales (Bribián et al., 2011). Por tanto, es imperativo explorar resoluciones constructivas a través de las alternativas posibles de materiales accesibles al mercado local, que permitan disminuir los impactos ambientales, en especial aquellos ligadas al cambio climático.

Históricamente, las acciones humanas relativas a la construcción y las mejoras edilicias no han considerado el impacto producido sobre el ambiente. No obstante, la situación de degradación ambiental actual impulsa a incorporar estas nociones en todas las actividades humanas, especialmente en aquellas que tienen gran capacidad para modificar el medio natural, como es la construcción. En este contexto toma fuerza el “Pensamiento de Ciclo de Vida”, que considera las consecuencias que cualquier acción humana provoca sobre el medio “desde la cuna hasta la tumba” (SETAC, 1997). Esto implica que, al estudiar los impactos que un producto, proceso o actividad genera en el medio, deben tenerse en cuenta todas las etapas de su ciclo de vida. Por tanto, el Pensamiento de Ciclo de Vida busca extender el alcance de la responsabilidad de los distintos actores sociales para incluir todas las etapas del ciclo de vida de las actividades donde estén involucrados (SETAC, 1997).

Para integrar estos conceptos, se presenta un caso de estudio correspondiente a una vivienda del Campamento Malargüe de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV), ubicada en el departamento de Malargüe, Provincia de Mendoza, que debe ser reparada para la utilización del personal vial. La refuncionalización tendrá en cuenta la importancia del cambio climático y el impacto de la construcción como se describió anteriormente,

aplicando estrategias energéticas del ecodiseño edilicio en la obra de reparación. Esto comprende el uso de una serie de elementos y técnicas constructivas que contribuyen a reducir su consumo energético y su impacto en el entorno, a través de los materiales en la envolvente, cubierta, muros y ventanas, de acuerdo a la zona bioambiental donde se ubica.

Este trabajo se integra con el trabajo de especialización abordado por la Arq. Ianina Medico (compañera de oficina en la DNV) en virtud del cual se definieron dos propuestas de mejora en los cerramientos constructivos, con el fin de disminuir el consumo de energía para calefaccionar la vivienda, considerando una temperatura de confort térmico de 18 °C. Esto implica el uso de diversos materiales de construcción, que ejercen influencia sobre la energía auxiliar necesaria para calefaccionar.

Además, siendo el inmueble un edificio público, se lo enmarca dentro de un programa nacional de edificios públicos existentes, motor que impulsa esta investigación para contribuir y fortalecer un modelo de desarrollo sustentable, que es especialmente relevante en edificios públicos. Es importante destacar que, si bien existen normativas, disposiciones y resoluciones administrativas, no hay antecedentes de este tipo de trabajo específico en las construcciones de la Dirección Nacional de Vialidad en todo el país.

De esta forma se aporta información valiosa y útil para la generación de un modelo que compendie una serie de pautas y medidas específicas a tomar en edificios de similares características pertenecientes a la repartición, teniendo en cuenta su ubicación geográfica y su comportamiento climático.

1.2. Objetivo general

En virtud de lo expresado, el objetivo general de este trabajo fue *comparar el desempeño ambiental en el ciclo de vida de dos propuestas de mejora edilicia para la vivienda del Campamento Malargüe de la Dirección Nacional de Vialidad a partir del análisis del impacto potencial sobre el cambio climático originado durante la construcción y el uso de la vivienda.*

1.3. Objetivos específicos

Para contribuir al objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la contribución al impacto potencial sobre el cambio climático de los elementos constructivos (muros, cubiertas y ventanas) definidos para cada una de las propuestas de mejora edilicia.
- Analizar la contribución al impacto potencial sobre el cambio climático de los flujos de materiales y de energía incorporados en cada una de las propuestas de mejora edilicia.

1.4. Hipótesis

La mejora en el ecodiseño edilicio de aislaciones en cerramientos perimetrales y la utilización de carpinterías más eficientes térmicamente en la obra de reparación de la vivienda del Campamento Malargüe, en busca de condiciones de confort térmico con menor utilización de energía auxiliar calórica para calefaccionar, logrará disminuir el impacto sobre el cambio climático en el ciclo de vida de la vivienda, respecto a las condiciones que se lograrían reparando y manteniendo los cerramientos y aberturas actuales de manera tradicional.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del caso de estudio

En la Figura 1 se sitúa el caso de estudio, que corresponde a una vivienda ubicada en el departamento de Malargüe, provincia de Mendoza, específicamente dentro del área urbana; pertenece a la Dirección Nacional de Vialidad, es una Unidad Ejecutora que desarrolla tareas administrativas y de campaña para el mantenimiento del corredor vial internacional de dicha región.

Su importante deterioro no permite el uso, razón por la cual se busca poner en funcionamiento dicho inmueble. La Arq. Ianina Medico, con quien se trabaja en conjunto, plantea en su trabajo final de especialización dos posibles mejoras en busca de eficiencia, particularmente de acuerdo con el consumo energético para climatización del espacio interior, desde los cerramientos constructivos, muros, ventanas y cubierta. En su trabajo, la Arq. propone la aplicación de estrategias energéticas del ecodiseño edilicio en la obra de refuncionalización.

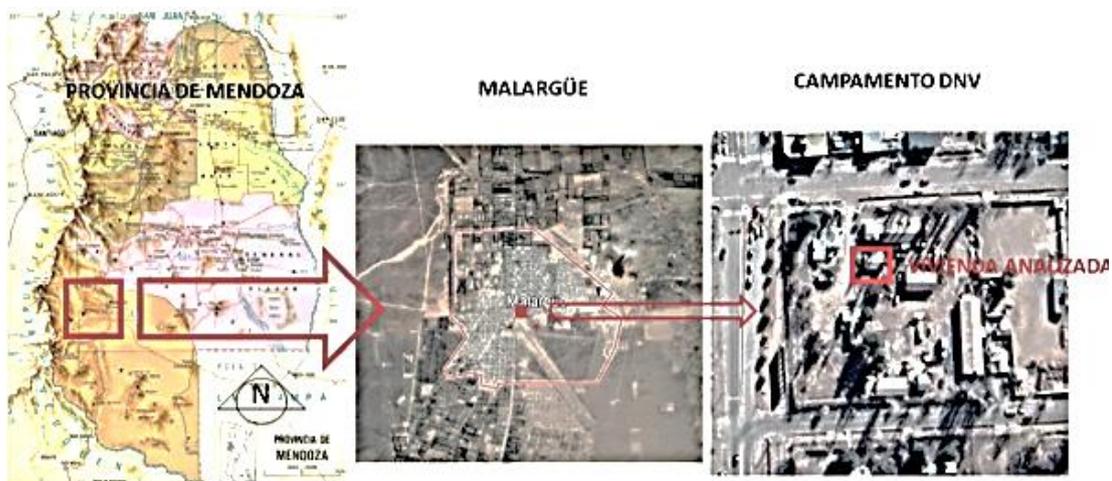


Figura 1. Localización de la vivienda estudiada.

En la Figura 2 se observa el desarrollo de la vivienda en una planta con 67 m² cubiertos. Se divide en dos dormitorios, un baño, cocina, comedor y depósito/lavandería. Los muros exteriores son de mampostería, con un espesor de 30 cm. La cubierta es de chapa

sinusoidal a dos aguas, con membrana como aislante hidrófugo, correas, machimbre y alfajías de madera. Los revoques interior y exteriores se encuentran deteriorados. Las ventanas son de madera y vidrio simple.

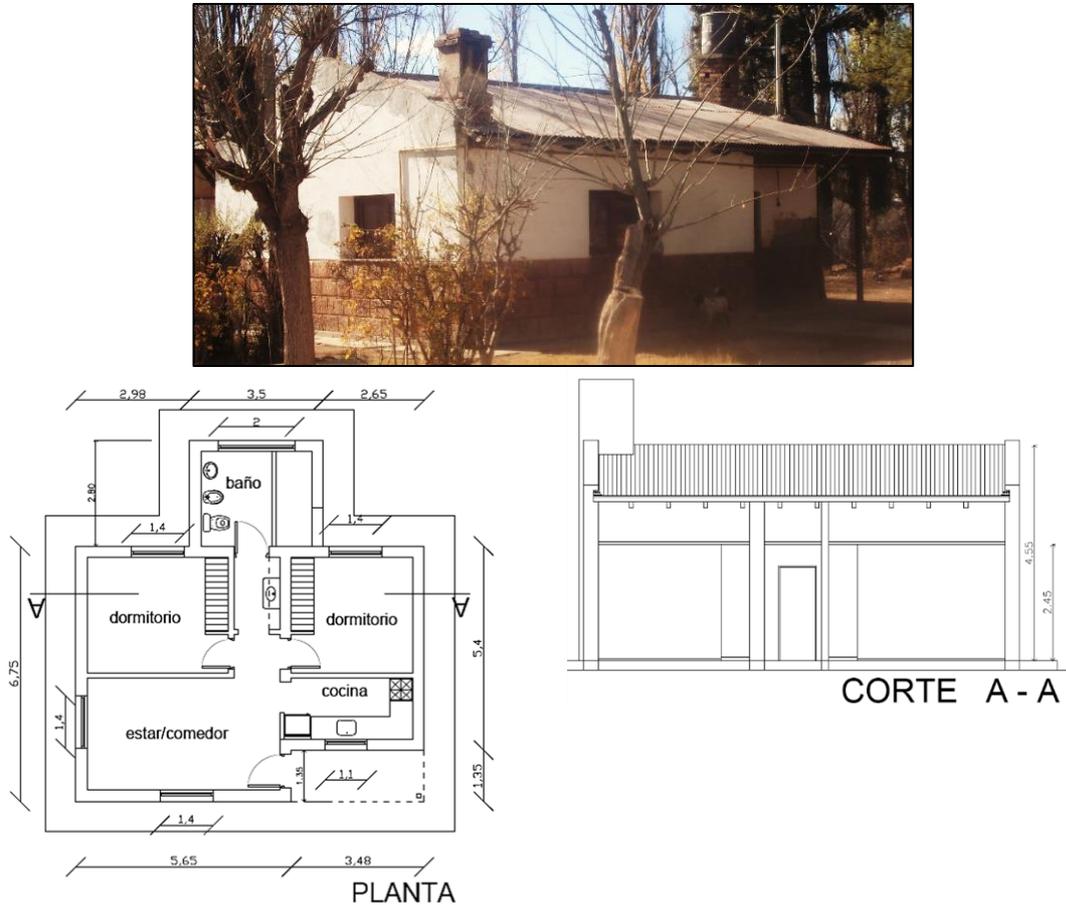


Figura 2. Caso de estudio “Vivienda Campamento Malargüe”. Imagen de la vivienda en su estado actual (arriba). Planos de planta (abajo-izquierda) y corte (abajo-derecha).

De acuerdo con lo establecido en la Norma IRAM 11603, que plantea criterios bioambientales para la zonificación de las distintas regiones del país acorde a sus características climáticas, la vivienda analizada se ubica en el límite de las zonas IV-Templada fría y la zona V-Fría. Las tablas de datos climáticos para invierno y verano de dicha norma establecen para Malargüe una temperatura media en invierno de 4,3 °C y en verano, de 18,7 °C, teniendo mínimas en invierno que pueden alcanzar los -18 °C. Por esta razón, se adopta la opción más desfavorable, es decir la zona bioambiental V-fría, que tiene como características inviernos rigurosos, con temperaturas medias del orden de 4 °C y mínimas menores a 0 °C, y veranos frescos, con temperaturas medias inferiores a 16 °C. Estas características brindan las pautas de diseño para las mejoras que se realizan en la refuncionalización de la vivienda y aportan datos necesarios para realizar el balance

térmico de la vivienda. Dicho análisis fue llevado a cabo por la Arq. Medico y los resultados son utilizados en el presente trabajo para estimar el requerimiento de energía térmica durante la fase de uso de la vivienda. Asimismo, se ha determinado la temperatura de confort, establecida en 18 °C a partir de la información proporcionada por los habitantes de la zona, quedando más próxima a la parte inferior del rango establecido por convención para el confort higrotérmico (temperatura en la que el cuerpo no tiene que poner en marcha ninguno de sus mecanismos de termorregulación para estar a gusto), que va desde los 18 °C a los 28 °C (Fernandez Llano, 2020).

2.2. Particularidades de las mejoras

Para el caso de estudio se propusieron dos mejoras constructivas diferentes. La primera es una reparación respetando los materiales existentes, cerramientos y cubierta, donde simplemente se incorporan ventanas con doble vidrio hermético (DVH) y marco de policloruro de vinilo (PVC). Por su parte, en la segunda se propone una mejora de la aislación térmica de la envolvente mediante la incorporación de materiales con características específicas para ese fin. A continuación, se ofrecen más detalles de cada una de las mejoras.

Descripción de la Mejora N°1: la repartición para este tipo de obras plantea la recuperación de la vivienda manteniendo sus características constructivas originales. Por esto solo se incorpora el cambio de las viejas carpinterías de madera por carpinterías de PVC con DVH, a fin de mejorar la aislación en los puntos más críticos por donde se pierde el calor interior. En los muros se recuperan los revoques exteriores e interiores dañados, para luego ser pintados, mientras que en la cubierta simplemente se recupera/barniza la madera de machimbre y por la parte superior se protege con membrana líquida.

Descripción de la Mejora N° 2: en el perímetro de la vivienda se incorpora la aislación de todos los muros exteriores, disminuyendo las pérdidas de calor interior por conducción, a través de la colocación de placas de poliestireno expandido (EPS) de 50 mm de espesor, revestido con base coat, que otorga adherencia y terminación. En la cubierta se agregan placas de EPS de 100 mm de espesor en el espacio de alfajías y luego se coloca chapa negra nueva. Tanto en los muros como en el techo, antes del EPS se coloca aislación hidrófuga. En el caso de las ventanas, se reemplaza la carpintería existente por una de aluminio y DVH.

2.3. Descripción de la metodología de análisis

La evaluación del desempeño ambiental de las dos propuestas de mejora para la refuncionalización de la vivienda estudiada se realizó siguiendo la metodología de la Huella de Carbono, que se inserta en el campo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para describir estas metodologías es primordial comenzar con la noción del **Pensamiento de Ciclo de Vida** (en inglés, *Life Cycle Thinking*), que, como se mencionó con anterioridad, considera las consecuencias que de las acciones humanas sobre el medio “desde la cuna hasta la tumba” (SETAC, 1997), puesto que en cada etapa del ciclo de vida los productos interactúan con otros sistemas o esferas, como la ambiental, la económica, la tecnológica y la social (Udo de Haes y van Rooijen, 2005). De este modo, cuando se toman decisiones o se aplican diferentes estrategias de manejo en el ciclo de vida de un producto, se busca evitar el traspaso de problemas de una etapa a otra, de un sitio a otro, o de un compartimento ambiental a otro (Udo de Haes y van Rooijen, 2005).

Por su parte, el **Análisis de Ciclo de Vida** (en inglés, *Life Cycle Assessment*), como concepto y herramienta de análisis ambiental, nació en la década de 1990, impulsado por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental “SETAC” (del inglés, *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*). En 1993, la SETAC definió al método del ACV como sigue: “Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada, y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final” (SETAC, 1993).

La norma ISO 14040:2006 define al ACV como una “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema- producto a través de su ciclo de vida”. Asimismo, establece que un estudio de ACV comprende cuatro fases: i) definición del objetivo y el alcance; ii) análisis de inventario; iii) evaluación de impactos; y, iv) interpretación de los resultados (ISO, 2006a). Los estudios de ACV revisten un carácter iterativo, que implica una constante retroalimentación entre las fases durante su ejecución (Figura 3).

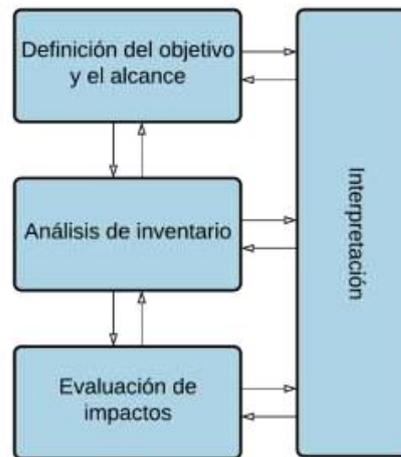


Figura 3. Fases de un ACV. Fuente: elaborado a partir de ISO (2006a).

Fase I: definición del objetivo y el alcance; el primero debe indicar sin ambigüedades la aplicación buscada, las razones por las que se realiza el estudio y los receptores esperados. Por su parte, el alcance comprende un conjunto de ítems que deben ser abordados y descritos, entre los que se hallan; el sistema-producto (o sistemas-producto) a ser estudiado; la definición de la función y la “unidad funcional” (UF); y los límites del sistema.

La definición de la UF es fundamental puesto que en el marco del ACV un producto, servicio o actividad se estudia según la función que desempeña. Por tanto, las funciones del sistema estudiado deben estar correctamente descriptas. Estas se expresan por medio de la UF, que se define como “el desempeño cuantificado de un sistema-producto para su uso como unidad de referencia en un estudio de ACV” (ISO, 2006a). El uso de la unidad funcional como medida de referencia confiere a los estudios de ACV un carácter relativo, ya que todas las entradas, salidas e impactos calculados estarán referidos a dicha unidad. En conjunto con la unidad funcional, se establece el “flujo de referencia”, que es la cantidad de producto que permite obtener la unidad funcional escogida.

Por otra parte, los límites del sistema determinan los “procesos unitarios” incluidos en un estudio de ACV, entendiendo como proceso unitario al “menor elemento considerado en el análisis de inventario de ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida” (ISO, 2006b). El sistema debe ser modelado de tal forma que los flujos de entrada y salida por sus límites sean “flujos elementales” (ISO, 2006a), esto es, materia o energía que ingresa al sistema desde el ambiente sin transformaciones previas, o que sale del mismo hacia el ambiente sin transformaciones subsecuentes (ISO, 2006b). Los estudios

de ACV suponen una perspectiva holística, aunque pueden poseer distinto alcance. Esto implica la consideración de algunas etapas o procesos y la exclusión de otros, y la definición de determinados enfoques; como por ejemplo el enfoque “de la puerta a la puerta”, que considera solamente aquellos procesos que suceden en la etapa de producción, o “dentro de las puertas de la fábrica”. No obstante, cuando se excluye algún proceso o etapa del ciclo de vida de un sistema-producto de los límites del sistema es preciso justificar debidamente. Para tal fin, es posible utilizar “reglas o criterios de corte”, que se comportan como umbrales de decisión para incluir o excluir un proceso, entrada o salida. Las reglas de corte deben estar correctamente descritas y suelen definirse en base a diferentes propiedades de los flujos de entrada o salida, tales como: i) la masa; ii) la energía; o, iii) la significancia ambiental (ISO, 2006b).

Fase II: análisis de inventario de ciclo de vida; esta fase comprende la recolección de datos y los procedimientos de cálculo necesarios para cuantificar las entradas y salidas de materia y energía relevantes de un sistema-producto, que se utilizan para confeccionar el inventario de ciclo de vida (ICV). Las entradas y salidas deben incluir el uso de recursos y las emisiones al aire, al agua y al suelo, asociadas al sistema evaluado según corresponda (ISO, 2006a).

A partir de la compilación de estos datos es posible extraer conclusiones para realizar un análisis de inventario de ciclo de vida. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, los datos son utilizados para completar la evaluación de impactos, correspondiente a la Fase III de un ACV.

Los datos deben ser colectados para cada proceso unitario comprendido dentro de los límites del sistema, y los procedimientos de cálculo deben conducir a datos de entradas y salidas referidos a la unidad funcional definida (ISO, 2006b). Por lo general, los datos pueden incluirse en dos grupos: i) datos de primer plano (en inglés, *foreground data*), que se cuantifican o miden en el sistema-producto; y, ii) datos de fondo (en inglés, *background data*), que corresponden a inventarios de ciclo de vida de insumos, energía, transportes, etc., y se obtienen de bases de datos (Rodríguez, 2021).

Fase III: evaluación de impactos de ciclo de vida (EICV); esta utiliza los resultados del inventario de ciclo de vida para analizar los impactos ambientales potenciales asociados al sistema-producto. La presente fase incluye el cálculo de indicadores para diferentes

categorías de impacto, que en conjunto conforman el “perfil ambiental” del producto estudiado (ISO, 2006b).

La norma ISO 14044:2006 establece que la evaluación de impactos de ciclo de vida posee elementos obligatorios y elementos opcionales. Entre los primeros encontramos; la selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, la clasificación y la caracterización de los impactos.

Estos elementos permiten convertir los resultados del ICV en impactos ambientales potenciales, comprendidos en diversas categorías de impacto que hacen alusión a distintos elementos del ambiente. La conversión se realiza por medio de “factores de caracterización” (FC), que proceden de los modelos de caracterización definidos para cada categoría de impacto. El uso de los factores de caracterización permite transformar todos los datos de inventario agrupados en una misma categoría en valores con una unidad común, que pueden ser agregados para obtener un único resultado del indicador de categoría (Rodríguez, 2021).

Fase IV: interpretación de los resultados; conlleva el análisis de los resultados derivados de las Fases II y III. Los hallazgos generados en esta fase deben adoptar la forma de conclusiones y recomendaciones, y deben estar en consonancia con el objetivo y el alcance definidos en la Fase I (ISO, 2006a).

2.4. Descripción de la Huella de Carbono (HC)

El cambio climático originado por la actividad antropogénica ha sido identificado como uno de los mayores desafíos que se enfrentan en la actualidad a nivel mundial, ya que tiene implicaciones para los sistemas humanos y naturales. En respuesta a esto, se desarrollan e implementan iniciativas a distintas escalas para prevenir y mitigar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera terrestre. Estas iniciativas se basan en la cuantificación, seguimiento, informe y verificación de emisiones y/o remociones de GEI (ISO, 2012).

En este contexto se inscribe el cálculo de la Huella de Carbono de producto, estandarizada en la norma ISO 14067:2018, y definida como la suma de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en un sistema-producto, expresadas como CO₂ equivalente, y basadas en una evaluación del ciclo de vida, utilizando la categoría de impacto única de

cambio climático (ISO, 2012). Dada la importancia del fenómeno del cambio climático a nivel global, esta categoría es usualmente considerada en los estudios de ciclo de vida.

Como se mencionó anteriormente, el cambio climático es consecuencia del aumento de la concentración de los GEI en la atmósfera, provocado por las grandes emisiones de estos gases a partir de actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles, la agricultura y la ganadería, la deforestación, entre otras. En efecto, la emisión de una determinada cantidad de un gas de efecto invernadero conduce al aumento de la concentración de estos en la atmósfera. Esto, a su vez, conduce al aumento del forzamiento radiativo, que provoca el incremento de la temperatura media global (Steinmann y Huijbregts, 2016) y, consecuentemente, un impacto sobre el clima.

La masa de cada GEI emitida a la atmósfera se cuantifica en el inventario de ciclo de vida del sistema-producto, mientras que los factores de caracterización están dados por el potencial de calentamiento global de cada gas. Estos valores son publicados periódicamente por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y son provistos para horizontes temporales de 20, 100 y 500 años. En este trabajo se adopta el enfoque de la norma IRAM-ISO 14067:2019, donde se establece la utilización de factores de caracterización con un horizonte temporal de 100 años. Finalmente, el resultado de categoría se calcula mediante la Ec. 1.

$$CC = \sum_i PCG_i * m_i \quad (\text{Ec. 1})$$

donde, CC es el impacto potencial sobre el cambio climático (o Huella de Carbono) causado por la unidad funcional [kg CO₂ eq]; PCG_i es el potencial de calentamiento global para cada gas i [kg CO₂ eq/kg GEI]; y m_i es la masa emitida de cada gas i [kg].

2.5. Aplicación de la metodología al caso de estudio.

Si bien la vivienda es un espacio habitable con diversas funciones, este trabajo se focaliza en la función de resguardo, teniendo en cuenta especialmente las condiciones de temperatura, que permitan a las personas/usuarios sentir una sensación de confort térmico agradable. Los sistemas-producto a comparar corresponden a la vivienda estudiada considerando dos alternativas de mejoras constructivas en los cerramientos, que conducen a la selección de una unidad funcional definida como “proveer resguardo para las personas/usuarios, alcanzando una temperatura de confort térmico de 18 °C durante 25

(veinticinco) años”. El período de vida útil requiere únicamente los mantenimientos básicos de limpieza en artefactos y de los materiales de cerramiento, es decir, no involucra modificaciones sustanciales durante este período.

La evaluación de estos sistemas-producto implica distintos procesos unitarios dentro de los límites del sistema. A nivel general, estos procesos se integran en dos etapas, que se describen posteriormente: i) la etapa de construcción, donde se consideró la producción de los materiales de construcción utilizados en cada alternativa de reparación de la vivienda; y ii) la etapa de uso, que integra la producción y combustión de Gas Licuado de Petróleo (GLP), utilizado para calefaccionar con el objeto de sostener la temperatura de confort definida durante los meses de bajas temperaturas. Los procesos de transporte de los insumos no se incluyen en el análisis porque su cálculo resultaría arbitrario, ya que no se estableció una localización específica de su origen. La Tabla 1.1 muestra los elementos metodológicos considerados.

Tabla 1.1. Unidad funcional, producto evaluado y etapas consideradas (límites del sistema).

Función del sistema	Unidad Funcional	Producto/Servicio considerado	Etapas de Construcción	Etapas de uso
Resguardo/protección de la temperatura exterior para los habitantes/usuarios.	Proveer resguardo alcanzando confort térmico de 18 °C (25 años).	Cerramientos constructivos en techos, muros y ventanas (Mejora N° 1 y Mejora N° 2).	Producción de materiales de construcción para los cerramientos.	Producción y combustión de GLP para calefacción de los módulos.

El análisis se realizó con enfoque “de la cuna a la puerta”. Los límites del sistema comprenden procesos de primer plano (en inglés, *foreground processes*) y procesos de fondo (en inglés, *background processes*), a saber:

- Procesos de primer plano: en la etapa de uso, generación de energía calórica.
- Procesos de fondo: en la etapa de construcción, extracción y procesamiento de materias primas, producción de los materiales utilizados para el cerramiento de la vivienda en las dos propuestas de mejora; en la etapa de uso, producción de GLP.

Los inventarios de ciclo de vida de cada mejora se elaboraron a partir de la experiencia profesional de la arquitectura, mediante el cálculo del uso de los materiales de acuerdo con la necesidad y las sugerencias de los fabricantes (Tablas 1.3 y 1.4). Por su parte, los

requerimientos de energía calórica para cada mejora se obtuvieron a partir del trabajo de la Arq. Medico (inédito) y se especifican más abajo. Finalmente, los datos de fondo referidos a las emisiones de GEI originadas durante la producción de los materiales de construcción se han obtenido en el marco del Proyecto GEF AR-G1002 “Eficiencia Energética y Energía Renovable en la Vivienda Social Argentina” y cedidos por gentileza del grupo de trabajo¹. Por su parte, los factores de emisión de GEI relativos a la combustión del GLP fueron extraídos de la base de datos publicada por GHG Protocol (2017), considerando el potencial de calentamiento global consignado en GHG Protocol (2015), mientras que las emisiones asociadas a su producción se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent v. 3.5 (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Emisiones de GEI derivadas de la producción y combustión de GLP.

Gas	Emisiones de GEI (kg CO₂ eq/MJ)		
	<i>Producción</i>	<i>Combustión</i>	<i>Total</i>
GLP	0,0145	0,0633	0,0778

Por su parte, en las Tablas 1.3 y 1.4 se presentan los detalles de los materiales necesarios para llevar a cabo las mejoras edilicias en las dos propuestas analizadas, que se configuran como los ICV de la etapa de construcción para cada mejora.

En este punto cabe aclarar que los elementos que forman parte de la estructura, tales como muros originales de mampostería original, fundaciones/bases, columnas, vigas y parte de la cubierta, particularmente correas y alfajías de madera, no se modifican en la refuncionalización y están incluidos en las dos mejoras. Por tanto, los materiales que conforman estos elementos no se han incorporado en los inventarios. Por otra parte, se estableció una regla de corte de 1% según la masa de los materiales incluidos.

¹ El Proyecto GEF AR-G1002 “Eficiencia Energética y Energía Renovable en la Vivienda Social Argentina” se llevó a cabo durante los años 2018 y 2019, con el objetivo de contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la mejora de la eficiencia energética en la vivienda social de Argentina. El grupo de trabajo estuvo conformado por investigadores de CONICET y del Grupo CLIOPE (FRM/UTN): A.P. Arena, R. Piastrellini, S. Curadelli, P.D. Rodríguez y F. Arce Bastias.

Tabla 1.3. Inventario de ciclo de vida de etapa de construcción para la **Mejora N° 1.**

Materiales	Cantidad (kg/m2)	Superficie a aplicar (m2)	Total (kg)
MUROS			
<i>Revestimiento interior</i>			
cemento	11,10	25,00	277,46
arena	92,61	25,00	2315,25
yeso aplicado	6,00	128,62	771,72
pintura	0,24	128,62	30,87
agua (total)	15,20	282,24	2595,20
<i>Revestimiento exterior</i>			
cemento	11,10	17,00	188,67
arena	92,61	17,00	1574,37
yeso aplicado	6,00	128,62	771,72
pintura	0,24	128,62	30,87
agua (total)	15,20	274,24	4167,08
VENTANA PVC-DVH			
ventana PVC-DVH	15,45	9,60	148,32
CUBIERTA			
agua	0,38	73,50	27,56
membrana liquida	1,00	73,50	73,50

Tabla 1.4. Inventario de ciclo de vida de etapa de construcción para la **Mejora N°2.**

Materiales	Cantidad (kg/m2)	Superficie a aplicar (m2)	Total (kg)
MUROS			
<i>Revestimiento interior</i>			
cemento	11,10	25,00	277,46
arena	92,61	25,00	2315,25
yeso aplicado	6,00	128,62	771,72
pintura	0,24	128,62	30,87
agua (total)	15,20	282,24	4288,64
<i>Revestimiento exterior</i>			
aislación hidrófuga	0,09	128,62	11,19
EPS (50mm)	1,00	128,62	128,62
malla fibra vidrio	0,16	128,62	20,58
base coat	8,00	128,62	1028,96
agua p/base coat	1,44	128,62	185,21
VENTANA ALUMINIO-DVH			
ventana aluminio	15,45	9,60	148,32
DVH			
CUBIERTA			
agua p/sellador-fijador	0,38	73,50	27,56
aislación hidrófuga	0,09	73,50	6,39
EPS (100mm)	2,00	73,50	147,00
chapa zinc negra	4,93	73,50	362,36

En cuanto a la etapa de uso, se consideró la energía necesaria para llegar a la temperatura de confort establecida (18 °C) en las dos mejoras, a partir de la combustión de GLP, combustible que se distribuye por red domiciliaria y se utiliza en el departamento de Malargüe para el sitio en cuestión. Entonces el cálculo de la energía requerida para calefaccionar el módulo habitacional se obtuvo del trabajo de especialización de la Arq. Medico (inédito), quien realizó un balance energético para las dos mejoras analizadas. En dicho trabajo se establece un requerimiento de 1337.14 MJ/año y de 35.26 MJ/año para calefaccionar el módulo considerando la Mejora N°1 y la Mejora N°2, respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados globales para las dos mejoras

A partir de los resultados de inventario asignados en la sección anterior, se evaluaron los impactos sobre el cambio climático derivados de la etapa de construcción de las mejoras en los cerramientos constructivos de la envolvente del caso de estudio, y de la etapa de uso de la vivienda, considerando la energía calórica auxiliar requerida para proteger al usuario de la temperatura exterior.

La Figura 4 muestra el impacto total sobre el cambio climático de las dos propuestas. Para la mejora N°1 fue de 5041,32 kg CO₂ eq/UF, mientras que para la mejora N° 2 fue de 4683,64 kg CO₂ eq/UF. Se observa que estos valores son muy cercanos, pero la contribución de cada etapa es diametralmente opuesta en cada una de las mejoras. En la mejora N°1, la etapa de uso reportó las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, representando el 86 % del impacto sobre el cambio climático, mientras que la etapa de construcción de la vivienda aportó el 14 % restante.

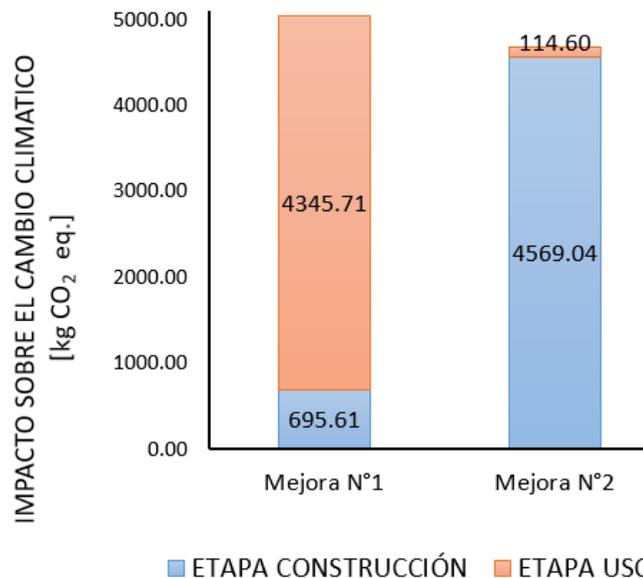


Figura 4. Contribución total y por etapa al impacto sobre el cambio climático para cada una de las mejoras evaluadas.

Por su parte, en el caso de la mejora N°2, la contribución al impacto ambiental considerablemente distanciada entre las dos etapas evaluadas permite observar que la etapa de construcción reportó casi la totalidad de las emisiones de gases de efecto invernadero, representando el 98 % del impacto sobre el cambio climático, mientras que la etapa de uso significó el 2 % del impacto total.

Particularmente, en la Figura 5 se observa que la mejora N°2 produjo un impacto potencial sobre el cambio climático casi siete veces mayor que la mejora N°1 respecto a la etapa de construcción. Por el contrario, durante la etapa de uso de la vivienda, el impacto sobre el cambio climático asociado a la mejora N°2 fue treinta y siete veces menor que para la mejora N°1.

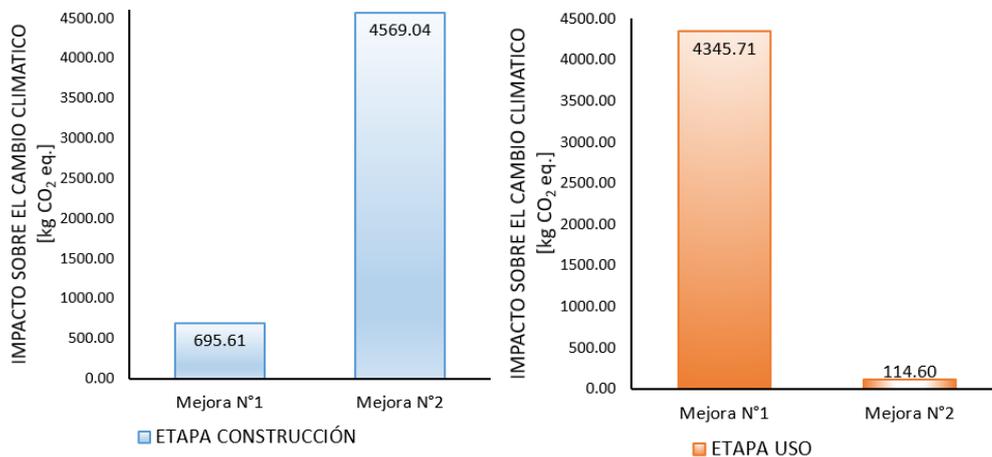


Figura 5. Contribución de cada etapa al impacto sobre el cambio climático, comparando las dos mejoras.

3.2. Contribución al impacto sobre el cambio climático de cada entrada de inventario de la etapa de construcción

En adición a lo anterior, se realizó un análisis más profundo detallando la contribución al impacto sobre el cambio climático de cada elemento de cerramiento constructivo en particular, en especial por la importancia en los resultados de la etapa de construcción en relación a la etapa de uso para la mejora N°2.

En la Figura 6 se muestra la contribución de cada elemento al impacto total de la etapa de construcción. En la mejora N°1 los cerramientos del muro reportaron las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, representando el 68 % del impacto sobre el cambio climático. En segundo lugar, se ubicó la fabricación y colocación de la ventana

de PVC (DVH), con una contribución de 25 %; y, finalmente, la construcción de la cubierta, que representó aproximadamente el 7 % del impacto total. En el caso de la mejora N°2, la construcción de la cubierta reportó las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, representando el 70 % del impacto sobre el cambio climático. En segundo lugar, se ubicó la construcción de muros, con una contribución de 28 %; y, finalmente, la fabricación y colocación de la ventana de aluminio (DVH), que representó el 2 % del impacto total.

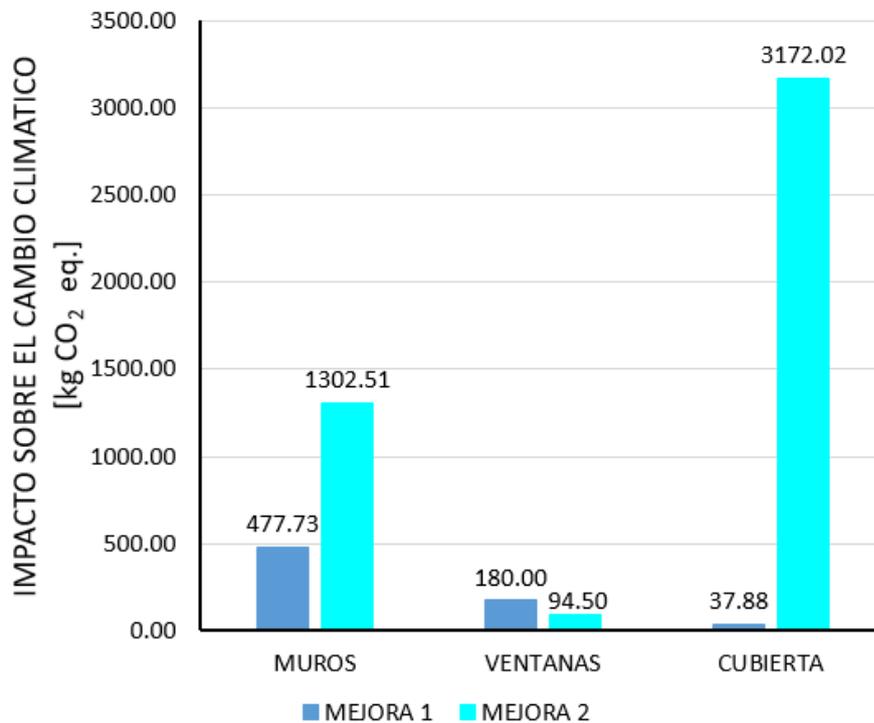


Figura 6. Contribución por elemento constructivo al impacto sobre el cambio climático para las dos mejoras (etapa construcción).

Como el análisis se focaliza en dos propuestas de cerramientos constructivos diferentes, se comparó el impacto asociado a la construcción de los tres elementos intervenidos (muros, ventanas y cubiertas). En cuanto a los muros, la mejora N°2 representa una emisión de gases de efecto invernadero cerca de tres veces mayor que la mejora N°1. Esto se debe al uso de mayor cantidad de materiales en la mejora N°2, y a la inclusión de materiales diferentes en los revestimientos, como la base coat, cuyo impacto es significativo y superior al de otros, como el cemento (Figura 7). Respecto a las ventanas, resultó que la materializada con PVC (DVH), propuesta en la mejora N°1, tuvo un impacto dos veces mayor que la de aluminio (DVH), incorporada en la mejora N°2. Esto se explica por la diferencia en el impacto asociado a la producción de los materiales que

las conforman, que es superior para el caso del PVC. Finalmente, la construcción de la cubierta en la mejora N°2 representó un impacto sobre el cambio climático ochenta veces mayor que en la mejora N°1, debido a que en esta última sólo se repara la cubierta, utilizando menor cantidad de materiales, mientras que en la segunda opción se efectúa un reemplazo con chapa nueva.

Específicamente, en la Figura 7 se observa el impacto por cada entrada/material tanto en la construcción de cerramientos de muros como en la cubierta para ambas mejoras, con el fin de identificar cuáles son los de mayor contribución para estudiar la posibilidad futura de reemplazar por un material de menor impacto ambiental. Los materiales con mayor impacto se encontraron en la mejora N°2, donde se destacó la chapa de zinc negra, seguida de la base coat. En el caso de la mejora N° 1, el cemento se ubicó como el material con mayor aporte al impacto, que es inferior al de los dos materiales mencionados anteriormente. El impacto asociado al resto de los materiales es considerablemente menor. Por lo tanto, para mejorar el desempeño ambiental de la mejora N°2 es necesario profundizar en el análisis de alternativas para sustituir a la chapa de zinc y la base coat; mientras que para la mejora N° 1 será preciso analizar el reemplazo o la disminución del uso de cemento.

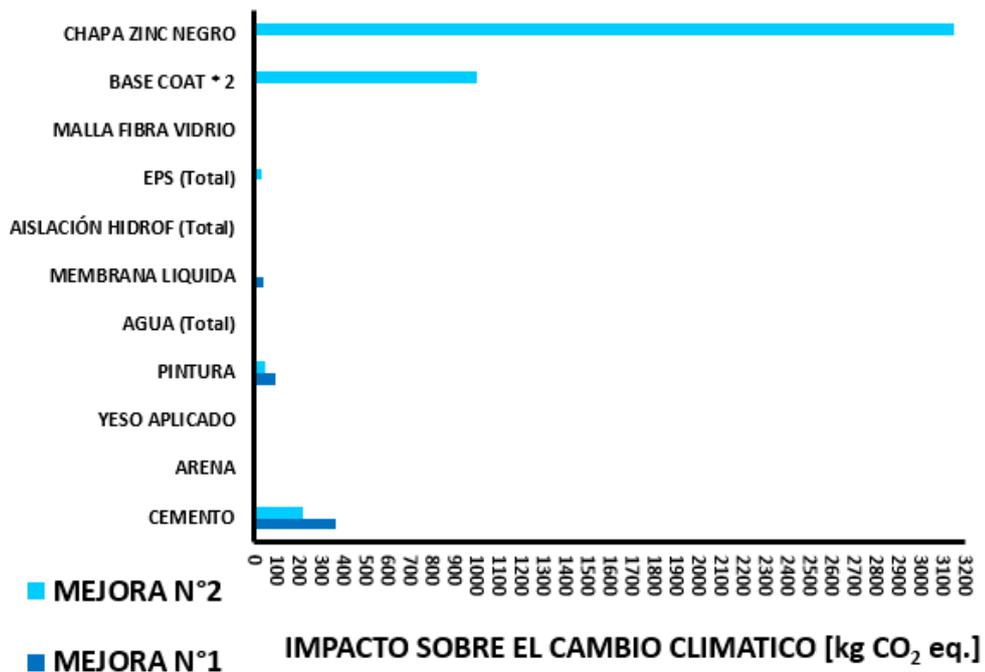


Figura 7. Contribución al impacto sobre el cambio climático por cada entrada material de muros y cubiertas para las dos mejoras (etapa construcción).

Por otro lado, es importante resaltar particularmente el desempeño del EPS, ya que entre los materiales utilizados es el de mejor comportamiento térmico. En efecto, se observó que la contribución al impacto del EPS incorporado tanto en los muros como en las cubiertas de la mejora N°2 fue baja, alcanzando un valor de 29,85 kg de CO₂ eq. De este modo, este material se destaca por su alta capacidad de sostener la temperatura ganada en el interior, ofreciendo ventajas ambientales por la disminución del requerimiento de energía para calefacción, sin incurrir en un aumento considerable de las emisiones de GEI durante la etapa de construcción.

3.3. Contribución al impacto sobre el cambio climático de la etapa de uso

Por último, es preciso analizar el comportamiento de las dos mejoras respecto a la etapa de uso de la vivienda, donde se consideró el requerimiento de energía auxiliar para calefacción. Se observó que las características de la envolvente de la mejora N°2 permiten reducir el uso de GLP para generar energía térmica respecto a la mejora N°1, lo que redundó en una disminución de las emisiones de GEI asociadas al uso de la vivienda. Sin embargo, para conseguir esta ventaja en la etapa de uso es preciso incurrir en un mayor impacto sobre el cambio climático durante la construcción, como se observó anteriormente (Figuras 4 y 5). Efectivamente, en la Figura 8 se evidencia que a partir del año 24 de uso de la vivienda se supera el umbral donde la mejora N°2 comienza a comportarse como la mejor opción respecto al impacto sobre el cambio climático. En otras palabras, en ese punto se justifica el mayor impacto incurrido para la construcción de la mejora N°2, que implica una disminución del impacto en la etapa de uso.

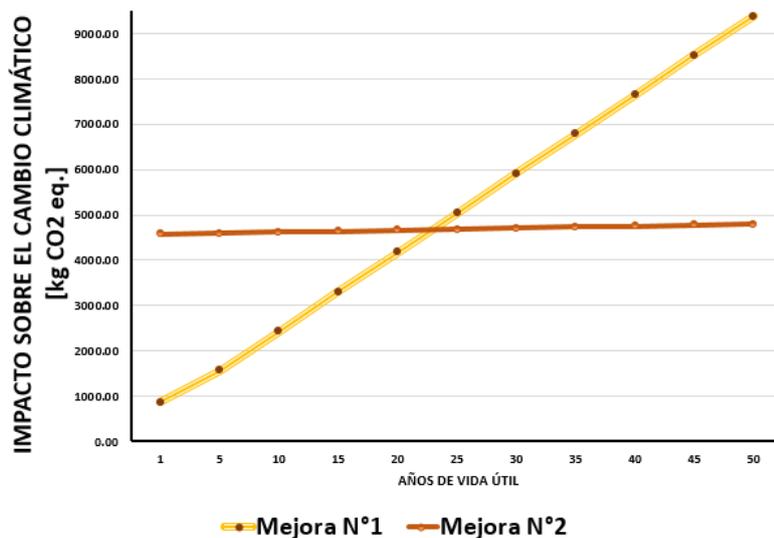


Figura 8. Contribución total al impacto a lo largo de la vida útil de las dos mejoras (etapa de uso).

4. CONCLUSIONES

El análisis del desempeño ambiental de las dos propuestas de mejora analizadas denotó en primera instancia valores similares. La mejora N°2 tuvo un comportamiento ligeramente superior en términos de impactos sobre el cambio climático al considerar las etapas de construcción y uso de la vivienda durante 25 años.

Particularmente, el análisis de la etapa de construcción reveló un mayor impacto asociado a la mejora N°2 en relación a la mejora N°1, mientras que en la etapa de uso la tendencia se invirtió. Esto es consecuencia de la mayor incorporación y del cambio de materiales para mejorar el aislamiento de la envolvente en la segunda opción, y que luego implican una reducción en la necesidad de energía calórica para mantener la temperatura interior. Sin embargo, el efecto de las mejoras edilicias de la propuesta N°2 se manifiestan a partir del año 24 de uso de la vivienda, por lo que esta mejora se recomienda si la vida útil supera este umbral de tiempo.

En consecuencia, resulta necesario profundizar en el análisis de la etapa de construcción, debido a que los materiales de cerramiento son los que permiten mejorar la capacidad respecto a la transmitancia térmica, influyendo directamente en la etapa de uso. En el caso de la mejora N°1, los muros se presentaron como el elemento constructivo de mayor impacto, mayoritariamente por el uso de cemento. Por su parte, en el caso de la mejora N°2, la cubierta mostró el mayor impacto ambiental, seguida por los muros. La mayor contribución de la cubierta se debió al uso de chapa de zinc negra, por lo que se recomienda a futuro buscar un material con menor impacto ambiental que reemplace su uso. Del mismo modo, en el caso de los muros se denotó una importante contribución de la base coat que impulsa la búsqueda de sustitutos con menor impacto o la disminución de su uso.

Un análisis más profundo de los materiales de construcción considerados mostró que el uso de materiales con mejor capacidad de aislación -es decir, con baja transmitancia térmica- en la mejora N°2, como el EPS, implica un impacto sobre el cambio climático muy bajo, mientras que mejora la capacidad de sostener la temperatura interior ganada de manera solar o por combustible, permitiendo usar menos energía auxiliar para

calefaccionar. Se puede decir entonces que es altamente recomendable su inclusión para todos los cerramientos (muros y cubierta).

En relación a las aberturas, la diferencia de impacto entre las dos opciones evaluadas induce a recomendar la ventana de aluminio (DVH). Si bien la ventana de PVC (DVH) se comporta mejor respecto a la capacidad de disminuir la pérdida de calor, este beneficio no se constató en relación a la reducción del impacto sobre el cambio climático en este trabajo.

En virtud del análisis realizado a lo largo del trabajo, y considerando que históricamente la vida útil de las edificaciones supera los 25 años requiriendo sólo mantenimientos de rutina, se concluye que la mejora N°2 es la mejor opción para la refacción de la vivienda estudiada. En efecto, a partir del año 24 de uso el beneficio de optar por los cambios propuestos en la mejora N°2 son notables en comparación con la mejora N°1.

Finalmente, se destaca la importancia de este estudio, puesto que representa la primera iniciativa para considerar el impacto ambiental en las obras de mantenimiento y refuncionalización de edificios pertenecientes a la Dirección Nacional de Vialidad. De este modo, se sienta un precedente para incluir las consideraciones ambientales junto con otras tradicionalmente estudiadas, como son los aspectos técnicos y económicos, cuando se evalúan obras a realizar en esta dependencia.

REFERENCIAS

- Bribián, I.Z., Capilla, A.V. y Usón, A.A (2011). Life Cycle Assessment of Building Materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ*, 46, 1133–1140.
- Fernandez LLano J. (2020) Apuntes de clase “Métodos de evaluación y predicción del Confort Térmico”, INAHE – CONICET Maestría en Desarrollo Sustentable del Hábitat Humano.M4 Confort térmico y balance energético edilicio.
- INCD. (2015). Acuerdo de París y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional <<https://www.cancilleria.gob.ar/es/actualidad/boletin/argentina-comprometida-contra-el-cambio-climatico/>> [consulta: 15 de abril de 2022].
- International Organization for Standardization-ISO. (2006a). International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Principles and Framework. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization-ISO. (2006b). International Standard 14044. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization-ISO. (2012). Draft International Standard 14067. Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication.
- Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Argentina. (2019). <<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/que-es-el-cambio-climatico/>> [consulta: 23 de julio de 2022].
- IRAM. (2012) Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina.
- Rodríguez, P.D.; Arena, A.P. y Civit, B.M. (2021). Tesis Doctoral “Contribuciones para la Evaluación de Impactos por Uso y Cambio de Uso de Suelo sobre Servicios Ecosistémicos de Provisión. Aplicación en el Estudio de la Producción de Microalgas en Sistemas Cerrados”. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry-SETAC. (1993). *Guidelines for Life-cycle Assessment: A Code of Practice* (pp. 73). SETAC.
- SETAC Europe Working Group. (1997). Life Cycle Assessment and Conceptually. Related Programs. SETAC Press.
- Steinmann, Z. y Huijbregts, M. (2016). Climate Change. En *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. National Institute for Public Health and the Environment.
- Udo de Haes, H. A. y van Rooijen, M. (2005). Life Cycle Approaches–The road from analysis to practice. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. <<https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2005%20-%20LCA.pdf>> [consulta: 15 de abril de 2022].