



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA



División de Estudios de Posgrado

Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

Tesis de Maestría

“Análisis de Ciclo de Vida de la producción de tarimas”

Presenta

Luis Modesto Reséndiz Sánchez

Grado a obtener: **Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera**

Director de tesis: **José Guadalupe Rutiaga Quiñones**

José Juan Alvarado Flores

Co-Director de tesis: **José María Ponce Ortega**

Morelia, Michoacán, septiembre de 2025

Índice

1. Marco Referencial	7
1.1 Introducción	7
1.1.2 Dimensiones y clasificación de la tarima	10
1.1.3 Tipos de tarima	12
Tarimas de madera	12
Tarimas de plástico	14
1.1.3 Tratamientos fitosanitarios en México	14
1.1.4 Tratamiento térmico (HT).....	15
1.1.5 Tratamiento térmico mediante calentamiento dieléctrico (DH).	15
1.1.6 Fumigación con bromuro de metilo (MB).....	16
1.2 Antecedentes	17
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivo General	19
1.4.1 Objetivos específicos	19
2. Justificación	19
3. Marco teórico	21
3.1 Definición de objetivos y alcance	22
3.2 Inventario de Ciclo de Vida (ICV).....	24
3.3 Evaluación de impacto (EICV)	24
3.3.1 Categorías de impacto:.....	25
3.3.2 Clasificación:.....	25
3.3.3 Caracterización:	25
3.3.4 Normalización:	25
3.4 Interpretación	27
4. Marco metodológico.....	28
4.1 Análisis de Ciclo de vida	28
4.1.1 Definición y alcance de objetivos.....	28
4.1.2 Definición de alcance.....	29
4.1.3 Unidad Funcional.....	29
4.1.4 Límites del sistema	31
4.1.5 Selección de tarimas	31
4.1.6 Caracterización de tarimas de madera	32

4.1.7	Caracterización de tarimas de plástico	34
	Fabricación de Tarimas de Plástico:	36
4.1.8	Alcance y límites del sistema.....	36
	Tarimas de Madera:	36
	Tarimas de Plástico:.....	37
	Exclusiones:	37
	Sistema de Producto	37
	Unidad Funcional:.....	38
	Procedimientos de Asignación:	38
4.1.9	Requerimientos de información	40
4.2	Inventario de Ciclo de Vida	41
4.2.1	Inventario del Ciclo de Vida de una Tarima de Madera	41
4.2.2	Extracción de madera en rollo	41
4.2.3	Aserrió de madera	42
4.2.4	Armado de tarimas	42
4.2.5	Tratamiento Térmico de Tarimas:.....	43
4.3	Inventario del Ciclo de Vida de una Tarima de Plástico.....	45
4.3.1	Producción de Resina HDPE.....	45
4.3.2	Fabricación de Tarimas de Plástico – Moldeo por Inyección.....	45
	Especificaciones:.....	46
4.3.3	Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.....	49
4.3.4	Cálculo de la Huella de Carbono	50
5.	Resultados y Discusión.....	51
5.1	Evaluación de ciclo de vida de tarimas de madera	51
	Extracción de materia prima:.....	52
	Aserrió:.....	52
	Armado:.....	52
	Tratamiento térmico:.....	53
5.2	Evaluación de ciclo de vida de tarimas de plástico	62
5.3	Comparación de los resultados del ACV de tarimas de madera y plástico.....	64
5.4	Interpretación de resultados.....	66
6.	Conclusiones	69
	Referencias	72

Resumen

En el contexto del comercio global, las tarimas son fundamentales para el transporte seguro de mercancías. Existen diferentes tipos de tarimas: las de madera, que son económicas pero vulnerables a plagas; las de plástico, duraderas, pero con alto impacto ambiental. Para evaluar el impacto ambiental de estos productos, se aplica el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una metodología basada en normas ISO 14040-44 que considera todas las etapas de producción desde la extracción de materias primas hasta la entrega del producto “Cuna a la puerta”. En México, el uso de tarimas de madera ha aumentado notablemente y ha impactado un beneficio económico, lo que ha elevado también el impacto ambiental de su producción. El estudio comparó una tarima de madera y una de plástico (ambas de 48” x 40”) enfocándose en los requerimientos energéticos y emisiones. Los datos fueron recolectados de un aserradero en Santa Clara del Cobre, Municipio de Salvador Escalante, Michoacán, México, utilizando fuentes primarias y bases de datos como Eco-Indicator 99 procesadas en SimaPro v9.3.0.3. Las fases del ACV incluyeron: definición de objetivos, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación. Se identificó que la etapa de extracción de la madera tiene el mayor impacto ambiental, debido principalmente al uso de sierras importadas de alta energía incorporada, mientras que el armado de la tarima tiene el menor impacto. El aserrío también es relevante por la alta generación de residuos (hasta 25 kg por tarima), los cuales podrían ser reutilizados para reducir su huella ecológica.

Palabras Clave: Tarimas, Ciclo de vida, Impacto ambiental, Eco-indicadores.

Abstract

In the context of global trade, pallets are essential for the safe transportation of goods. There are different types of pallets: wooden ones, which are economical but vulnerable to pests; and plastic ones, which are durable but have a high environmental impact. To assess the environmental impact of these products, Life Cycle Assessment (LCA) is applied—a methodology based on ISO 14040–44 standards that considers all production stages from raw material extraction to product delivery (“cradle to gate”). In Mexico, the use of wooden pallets has increased significantly and generated economic benefits, but this has also raised the environmental impact of their production. The study compared a wooden pallet and a plastic pallet (both 48” x 40”), focusing on energy requirements and emissions. Data were collected from a sawmill in Santa Clara del Cobre, Municipality of Salvador Escalante, Michoacán, Mexico, using primary sources and databases such as Eco-Indicator 99 processed in SimaPro v9.3.0.3. The LCA phases included: goal definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation. It was identified that the wood extraction stage has the greatest environmental impact, mainly due to the use of imported saws with high embodied energy, while pallet assembly has the lowest impact. Sawmilling is also relevant because of the high generation of waste (up to 25 kg per pallet), which could be reused to reduce its ecological footprint.

Keywords: Pallets, Life Cycle, Environmental Impact, Eco-indicators.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a mis padres que siempre me han apoyado, me han brindado las herramientas necesarias para mejorar, seguir adelante y hacer las cosas que me gustan.

A mis abuelos, en especial a mi abuelita Julia que siempre me dijo que no me conformara con poco, que siempre buscara hacer más y mejores cosas.

A mi novia por ser mi compañera constante, por su paciencia, su ánimo y su confianza en mí.

A mi hermana, que siempre ha sido un ejemplo de fortaleza.

A Lluvia, que siempre me acompañó por las noches mientras hacía tarea y avanzaba con mi tesis.

A Leo, Marcos y Jesús, por brindarme su amistad y confianza para poder tomar los datos necesarios para hacer mi tesis y poder presentar mi trabajo en congresos.

Su apoyo ha sido fundamental para seguir adelante y dar lo mejor de mí.

1. Marco Referencial

1.1 Introducción

En el mundo contemporáneo, caracterizado por una creciente movilidad y un incremento en el comercio, el transporte seguro de materiales y mercancías a través de los diversos actores de la economía se ha convertido en una necesidad imperante. Este flujo constante abarca desde los proveedores a los fabricantes, de los fabricantes a los almacenes, de los almacenes a los minoristas, y finalmente, a los consumidores. La importancia de este proceso logístico es evidente y se vuelve aún más crucial con la expansión del comercio global. En este contexto, las tarimas emergen como componentes fundamentales en la cadena de suministro, desempeñando un papel esencial en la movilización de bienes, facilitando la eficiencia y la seguridad en el transporte de mercancías a lo largo de toda la cadena logística.

Las tarimas son estructuras planas utilizadas en el embalaje de transporte por casi todas las industrias, incluyendo comestibles, bebidas, tambores, productos químicos, entre otros. En la industria del transporte, las mercancías y los contenedores se amarran a las tarimas y se transportan en unidades a granel. Los montacargas pueden levantar fácilmente tarimas de diferentes tamaños, lo que las hace adecuadas para mover mercancías en entornos automatizados.

Los tamaños de las tarimas varían de un continente a otro y de una aplicación a otra. Se utilizan diferentes tamaños según los estantes y los dispositivos de manejo de materiales propios de cada país o región. La Unión Europea utiliza una tarima "EURO" que mide 1200 mm x 800 mm, siendo el tamaño continental más común (Rodríguez, 2015). Las tarimas más comúnmente utilizadas en los Estados Unidos son las tarimas VG o tarima americana de 48" x 40" (1219 x 1016 mm), estandarizadas por la Asociación de Fabricantes de Comestibles (GMA) (NWPCA, 2014).

Principalmente, las tarimas se fabrican de madera, plástico, metal y cartón. Las tarimas de madera son las más comunes debido a su costo relativamente bajo y su

capacidad para soportar cargas pesadas. Sin embargo, las tarimas de plástico han ganado popularidad en industrias que requieren altos niveles de higiene y durabilidad. Las tarimas de metal, aunque menos comunes, se utilizan en situaciones donde se necesita una resistencia adicional, y las tarimas de cartón se emplean en aplicaciones donde el peso ligero y la reciclabilidad son cruciales.

Cada tipo de tarima presenta ventajas y desventajas específicas. Las tarimas de madera, por ejemplo, son económicas y fáciles de reparar, pero pueden ser propensas a daños y a la proliferación de plagas, requiriendo tratamiento de cuarentena para matar plagas antes de su uso, lo que cuesta tiempo y dinero adicional (CMAT, 2024). Las tarimas de plástico, aunque más costosas, ofrecen una mayor durabilidad y son resistentes a la humedad y a los productos químicos. Las tarimas de metal son extremadamente robustas pero pesadas y caras, mientras que las tarimas de cartón son ligeras y reciclables, pero no tan duraderas como sus contrapartes de madera o plástico.

En términos de sostenibilidad, la elección del material de las tarimas juega un papel importante. Las tarimas de madera son renovables y pueden ser recicladas en gran medida, aunque su producción puede implicar la tala de árboles. Las tarimas de plástico, si bien duraderas, plantean desafíos en términos de reciclaje y pueden contribuir a la contaminación plástica. Por otro lado, las tarimas de cartón y metal presentan opciones reciclables; las de metal destacan por su longevidad. Se estima que el 93% de las tarimas en uso hoy en día son de madera, tanto en el uso doméstico como en la exportación internacional (NWPCA, 2008).

Es evidente que la contaminación en el uso de tarimas no sólo depende de la elección del material, sino también de cómo se planifican y anticipan sus impactos futuros. El desarrollo de escenarios en un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite evaluar de manera integral los posibles efectos ambientales y económicos de las tarimas a lo largo de su ciclo de vida. Esta aproximación sistemática y prospectiva es crucial para tomar decisiones informadas que minimicen el impacto ambiental. Por lo tanto, considerar tanto la sostenibilidad material de las tarimas, como su ACV

bajo diversos escenarios futuros, es esencial para mejorar su uso en la cadena de suministro global.

Un ACV es una metodología que se utiliza para medir los impactos ambientales que se pueden generar a partir de un producto, un proceso o una actividad, esta metodología se ha desarrollado a la par de las normas ISO 14040-44 (2006).

El ACV tiene la finalidad de determinar la magnitud de los impactos ambientales, para diferentes propósitos tales como, identificar oportunidades de mejora en lo que se refiere al uso de recursos y desempeño ambiental, aportar información para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades y el diseño o rediseño de productos y el establecimiento de aseveraciones comparativas entre productos que desempeñan una misma función (Heinimann, 2012).

Los primeros estudios de ACV en la industria forestal aparecen en Europa en la década de los noventa. Desde entonces, se han desarrollado investigaciones motivadas por la creciente preocupación sobre el cambio climático y la alta involucración de los clientes sobre los impactos ambientales de los productos y servicios que ofrece el mercado (Klein et al., 2015)

Por ende, se busca que las compañías sigan directrices ambientales reales, como los marcos regulatorios establecidos por las autoridades competentes, normas ISO, además, tomen en cuenta iniciativas como la Agenda 2030, la cual tiene como objetivo incentivar modelos de producción más sustentables y libres de contaminación dentro de la legalidad (ONU, 2018).

En Cataluña, al noroeste de España, la industria forestal y maderera es una parte activa de la economía. Aproximadamente el 63.5% del territorio es área forestal (más de 2 millones de hectáreas), de las cuales el 60.5% es terreno boscoso. La principal actividad de la industria maderera es la fabricación de embalajes de madera, utilizando el 85% de la madera aserrada para fabricar tarimas, que es el producto de madera más común fabricado en la región. En el caso de Europa, alrededor del 20% de todo el consumo de madera aserrada se utiliza para tarimas y embalajes de madera (García-Durañona et al., 2016).

Tan sólo en México en los últimos años que se tiene registro, ha tenido un aumento en venta de tarimas, ya que en enero de 2018 se generó una venta total de \$1,239,183,000 pesos mexicano y en octubre de 2023 fue de \$1,755,890,000 pesos mexicanos, siendo así un incremento en el año 2023 de más del 40% respecto al 2018 (INEGI, 2023). Lo cual nos deja ver el valor de la madera en este mercado y su alta demanda, esto atribuye impactos ambientales generados en los mismos aserraderos para la producción de la tarima.

1.1.2 Dimensiones y clasificación de la tarima

Las tarimas de madera están clasificadas con base a su tamaño, clase y uso. El tamaño de la tarima se expresa como el largo y el ancho. La clase de la tarima se puede definir entre “barrotes” y “tacones”, las tarimas de clase “barrotes” están hechas de tablas rectangulares que se extienden a lo largo de la misma, con la plataforma superior clavada a los bordes de las tablas, mientras que las de clase de “tacones” constan de bloques rectangulares que separan la plataforma superior y la plataforma inferior. Las tarimas de “barrotes” están hechas de tablas rectangulares que se extienden a lo largo de la misma, con la plataforma superior clavada a los bordes de las tablas (**Figura 1**), mientras que las tarimas de “tacones” consisten en bloques rectangulares que separan la plataforma superior y la plataforma inferior (**Figura 2**).



Figura 1. Tarima de barrote (Fuente: Propia)



Figura 2. Tarima de tacones (Fuente: Propia)

Las tarimas también se suelen clasificar según sus dimensiones. Las dos dimensiones que se miden son la longitud de la tabla delgada y la longitud del barrote, normalmente se dividen por región (**Tabla 1**).

Tabla 1. Tamaños de tarima usados por región.

Tamaño en pulgadas

Región

48 x 40	Americano
43.3 x 43.3	Asiático
47.24 x 31.49	Europeo

1.1.3 Tipos de tarima

Si bien la mayoría de las tarimas fabricadas y utilizadas en todo el mundo son de madera, también se utilizan otros materiales como el plástico y el cartón para fabricarlos. Dependiendo del tipo de aplicación y del sector, los materiales difieren. Aproximadamente el 90% de las tarimas actuales están hechos de madera, mientras que el 10% restante está hecho de una variedad de otros materiales como acero, HDPE, PVC, madera contrachapada, OSB (tablero de fibras orientadas), cartón corrugado (**Figura 3**) (Clarke, 2002).



Figura 3. Tarima de madera, cartón, plástico.

Tarimas de madera

En México las tarimas de madera generalmente se fabrican a partir de madera blanda aserrada debido a su disponibilidad en la región. La madera utilizada para las tarimas nuevas es un subproducto de tablas, la industria del aserradero o es fabricada directamente a partir de “trozas” de madera (grandes bloques de madera producidos en el bosque) (**Figura 4**). Los árboles talados, como troncos de largas dimensiones, se utilizan para fabricar para productos como muebles, pisos, gualdras, vigas, durmientes, etc.; la mayoría de la madera para tarima viene de

cortas dimensiones, que son trozas que miden entre 2 y 6 pies de largo (0.61 a 1.82 metros) y suelen ser madera de menor calidad, sin embargo, esto no significa que la madera sea aceptable con imperfecciones como los nudos (CMAT, 2024).



Figura 4. Troza de madera de cortas dimensiones en aserradero (Fuente: propia)

Las tarimas al final de su vida útil generalmente se desmantelan y se reciclan o se convierten en otros artículos. El porcentaje de tarimas enviados a rellenos sanitarios o basureros es muy bajo. Una tarima que no se puede reparar ni revender se descompone en sus componentes básicos en piezas para fabricar tarimas recicladas (todos los materiales usados) o remanufacturadas (una mezcla de madera nueva y usada) (CMAT, 2024).

Aquellas tarimas que no tienen componentes utilizables se trituran para abono y/o se mezclan con la recogida de residuos urbanos.

Las medidas fitosanitarias aprobadas internacionalmente y reconocidas oficialmente por México para el tratamiento fitosanitario del embalaje de madera que se utilice en el comercio internacional son:

- Tratamiento térmico (HT)
- Tratamiento térmico mediante calentamiento dieléctrico (DH)
- Fumigación con bromuro de metilo (MB).

Sin embargo, para el mercado nacional no suele ser un requisito aplicar un tratamiento fitosanitario (SEMARNAT, 2017).

Tarimas de plástico

Las tarimas de plástico están hechas de materiales como polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo (PVC), policloruro butiratos (PCB) y butirato estireno acrílico (ABS). Se han utilizado cada vez más porque son livianos, resistentes al ataque de plagas (y por lo tanto no necesitan tratamiento fitosanitario) y tienen una larga vida útil. Son preferibles para aplicaciones de envío en las que los costos tienen poca o ninguna consecuencia para el transportista. Los procesos utilizados para fabricar tarimas de plástico son el moldeo por inyección, el moldeo de espuma estructural, el termoformado, el moldeo por compresión, el moldeo rotacional y la extrusión de perfiles. Las tarimas de plástico suelen ser de 4 vías que se pueden apilar fácilmente con carretillas elevadoras. Tienen un foso exterior para evitar que se doblen bajo cargas elevadas. Para alcanzar los niveles de retardo de fuego las tarimas de plástico deben contener aditivos químicos como decabromo-bifenilo, un retardante de fuego controvertido y potencialmente tóxico. La EPA clasifica el decabromo como un posible carcinógeno humano, lo que representa un riesgo intolerable para la seguridad humana (Bilbao, 2011).

1.1.3 Tratamientos fitosanitarios en México

El material de embalaje de madera elaborado con madera aserrada sin procesar puede exacerbar la propagación de plagas y provocar problemas graves. En los Estados Unidos entre 1906 y 1991, una pequeña porción de especies de plagas introducidas causó pérdidas estimadas en al menos 97 mil millones de dólares

(Windle, 1997). Estas plagas introducidas afectan los sistemas naturales como la agricultura, la silvicultura, la industria y la salud humana.

Antes de utilizarlos para embalaje y transporte, las tarimas se tratan para matar o erradicar plagas potencialmente invasoras. El tratamiento de la madera para matar estas plagas destructivas se conoce como tratamiento fitosanitario. Los fabricantes internacionales de tarimas y las autoridades portuarias adoptan medidas de tratamiento fitosanitario para tratar y restringir la transmisión de plagas (CMAT, 2024).

1.1.4 Tratamiento térmico (HT)

El tratamiento térmico convencional requiere que las tarimas de madera se calienten a una temperatura específica durante un tiempo específico, de acuerdo con la NOM-144-SEMARNAT-2017. El tratamiento térmico se puede lograr en tan sólo 2 horas o hasta 15 horas, dependiendo del equipo utilizado, el tamaño y diseño de las tarimas y los requisitos del cliente. La cámara de calentamiento se controla mediante un ordenador. Se perforan sondas en las tarimas mientras están en la cámara, midiendo las temperaturas en la parte más gruesa (tabla gruesa). Cuando la sonda más fría alcanza los 56°C/132°F, el cronómetro se pone en marcha y esa temperatura específica debe mantenerse durante al menos 30 minutos. Normalmente, los períodos de calentamiento y enfriamiento son los más largos. Además, el tratamiento térmico utiliza hornos convencionales grandes y costosos y una fuente de combustión que conduce a la emisión de contaminantes atmosféricos, tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros óxidos de nitrógeno.

1.1.5 Tratamiento térmico mediante calentamiento dieléctrico (DH).

El tratamiento térmico mediante calentamiento dieléctrico consiste en la utilización de ondas electromagnéticas, como las microondas o las ondas de radiofrecuencia para producir calor.

Debe calentarse hasta alcanzar una temperatura mínima de 60 °C durante 1 minuto continuo en todo el perfil de la madera (incluida su superficie). La temperatura prescrita debe alcanzarse dentro de los 30 minutos a partir del comienzo del tratamiento. Para madera que mida más de 5 cm de espesor, el calentamiento dieléctrico a 2.45 Giga Hertz (GHz) requiere la aplicación de energía de microondas bidireccionales o guías de ondas múltiples con el fin de asegurar el suministro uniforme del calor (Bilbao, 2011).

1.1.6 Fumigación con bromuro de metilo (MB)

La fumigación es un proceso de control de plagas en el que se rocían pesticidas químicos para llenar completamente un área restringida donde se guardan las muestras de tratamiento (en este caso, tarimas de madera). La fumigación con bromuro de metilo (MB) requiere aproximadamente 25 horas e implica la pulverización de MB líquido a presión, que se convierte a la fase gaseosa y, por lo tanto, es una difusión química en los materiales de embalaje de madera. El proceso conduce a la emisión de MB, considerado un gas que agota la capa de ozono, y por lo tanto crea importantes preocupaciones ambientales. Debido a sus efectos nocivos sobre el ozono, el uso de la fumigación con BM se ha eliminado de todas sus aplicaciones. La fumigación con BM requiere una inversión de capital relativamente baja; sin embargo, no es efectivo para productores de tarimas de gran volumen o para madera aserrada gruesa o de gran tamaño (estiba).

1.2 Antecedentes

Kurisunkal (2010) realizó un trabajo que implica la investigación y evaluación de las cargas ambientales incurridas mediante un ACV consecuente que compara cada una de las etapas del ciclo de vida de tarimas de madera y de plástico. Establece un especial énfasis en comparar el tratamiento térmico, la fumigación con bromuro de metilo y el calentamiento por radiofrecuencia (RF) para determinar las opciones de tratamiento más efectivas, ambientalmente limpias y económicamente viables. Los objetivos de su trabajo fueron demostrar que el calentamiento dieléctrico utilizando tecnología de RF es: (1) igual o más efectivo para matar plagas en la madera, y (2) ambientalmente superior a los tratamientos disponibles actualmente.

Niero et al. (2014) analizaron el uso de la parametrización dentro del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) en el sector de tarimas de madera, con el fin de probar la efectividad de los modelos paramétricos de ICV para calcular los impactos ambientales de productos similares. Partiendo de un único caso de estudio, los objetivos de su trabajo fueron: (1) desarrollar un modelo paramétrico ICV adaptable a una gama de tarimas de madera, (2) probar este modelo con un producto de referencia y (3) determinar correlaciones numéricas entre los impactos ambientales y los parámetros ICV más significativos.

Salmerón et al. (2021) realizaron una investigación en donde evalúan el impacto sobre el cambio climático del ciclo de vida de las tarimas de madera elaboradas en la región Huetar Norte de Costa Rica, donde establecen los límites del sistema, que van desde la preparación del terreno para establecer las plantaciones, hasta la puerta de llegada a la empacadora. Evaluaron dos unidades funcionales: a) una tarima con dimensiones comerciales para la manipulación y trasiego de productos agrícolas y b) un metro cúbico de madera para producción de tarimas. Asimismo, evaluaron dos sistemas de producto: con biomasa en el tratamiento térmico y con gas LP.

García-Durañona et al. (2016) analizaron el impacto de la cadena de suministro de madera de coníferas para la producción de madera aserrada y tarimas, desde las operaciones forestales hasta la entrada de la instalación de producción. Aplicaron la metodología de ACV a ambos productos (madera aserrada y tarima) utilizando datos primarios proporcionados por la industria para identificar los puntos de mayor impacto del ciclo de vida. Evaluaron seis categorías de impacto de punto medio utilizando la metodología ReCiPe: cambio climático, agotamiento del ozono, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, toxicidad humana; ocupación de tierras agrícolas y agotamiento del agua. Además, se evaluó la demanda acumulada de energía.

Mazeika Bilbao (2011) evaluó un modelo que determinaría el impacto de los materiales de las tarimas, la fabricación, la distribución y las operaciones de recuperación en una métrica de desempeño ambiental (como las emisiones de dióxido de carbono), así como en el costo. La “programación en enteros mixta” (un problema de flujo de red de múltiples productos de costo mínimo) se utiliza para diseñar el sistema que determina la combinación de tarima (tipo, cantidad y sistema de gestión de tarimas) para la distribución de productos que equilibra los impactos y costos ambientales generales según las empresas y sus necesidades.

Anil et al. (2020) comparan el rendimiento del ciclo de vida de tarimas de madera y plástico tratados a través de una evaluación detallada del ACV desde el inicio hasta la tumba y realiza un análisis de los diversos tratamientos fitosanitarios. Los impactos ambientales de las tarimas las comparan sobre la base de un solo viaje y de 100,000 viajes. Eligen las categorías de impacto según sus preocupaciones ambientales.

Santos *et al.* (2017) hacen una comparación del uso de tarimas de maderas desechadas, como fuente de energía, en comparación con combustibles fósiles como gas natural y gasolina.

1.3 Hipótesis

El uso de herramientas del ciclo de vida permitirá evaluar el impacto ambiental global en la producción de tarimas en el aserradero seleccionado, con la expectativa de que las tarimas de madera presenten un menor impacto ambiental en comparación con la tarima de plástico, y así proponer las mejores estrategias para su optimización y mitigación de impactos.

1.4 Objetivo General

- Analizar los impactos ambientales potenciales del proceso de producción de tarimas (tarima americana) y sus diferentes etapas de proceso en un aserradero en la localidad de Santa Clara del Cobre, Salvador Escalante, haciendo la comparación con una tarima de plástico.

1.4.1 Objetivos específicos

- Estudiar su sistema de producción (fases, etapas y flujos del proceso).
- Desarrollar el análisis del ciclo de vida para la cadena de valor asociada a la producción de tarima.
- Identificar las oportunidades de mejora ambiental en los sistemas.
- Realizar la comparación de los resultados en los dos aserraderos.

2. Justificación

México generó \$10,028,397,197 pesos en la industria de la madera en el año 2018, dónde \$1,239,183,000 pesos fueron de la venta de tarima, es decir, el 12.35% del valor total, tan solo Michoacán tuvo una producción forestal maderable de 452,273 metros cúbicos de madera en rollo, sin embargo, para la fabricación de tarima en el estado los aserraderos llegan a comprar madera en rollo o aserrada a diferentes regiones del país (CONAFOR, 2021; INEGI, 2023).

La producción de tarima genera impactos ambientales y en sus etapas puede generar degradación del suelo, la contaminación del agua, emisiones de gases de

efecto invernadero, etc. En países europeos se busca medir los mayores impactos de los procesos de un producto mediante el análisis de las etapas del proceso y la identificación de las mejores prácticas, como lo llega a ser un estudio de ACV, el cual nos permite evaluar toda la cadena de valor de un producto en todas sus etapas buscando la mejora ambiental y buscando un menor impacto en la huella ecológica. Además, la optimización de algún proceso puede generar subproductos o coproductos que pueden ser revalorizados para generar ingresos económicos adicionales.

Es por eso por lo que este estudio busca la evaluación del ACV en la producción de tarima considerando las diferentes etapas del proceso, lo cual nos permitirá identificar oportunidades de mejora ambientales y, subsecuente, económicas.

Además, en la investigación bibliográfica realizada, no se encontró un estudio previo sobre el ACV de la producción de la tarima en México, lo que resalta la importancia de esta investigación. La mayoría de las investigaciones se realizaron en Estados Unidos y en Europa, salvo Salmerón et al. (2021) y Santos et al. (2017) que fueron realizadas en Costa Rica y Brasil, respectivamente.

3. Marco teórico

Como anteriormente se mencionó, el ACV estudia los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad. El ciclo de vida en un producto se considera toda la “historia” del producto, desde su materia prima hasta su destino final como residuo. Se consideran todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc.

El ACV consiste por tanto en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida.

Para realizar un ACV se utiliza un protocolo ya establecido y elaborado por International Standards Organisation (ISO), el cual brinda herramientas ambientales, normativas y documentos técnicos para la elaboración de dicho estudio. Con base en la metodología ISO 14040 (2006), un proyecto de ACV se puede dividir en cuatro fases: definición de objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación.

Como se muestra en la **Figura 5**, el ACV es una técnica iterativa, es decir, estas cuatro fases no son simplemente secuenciales, se debe de repetir el proceso tantas veces como sea necesario para alcanzar el objetivo.

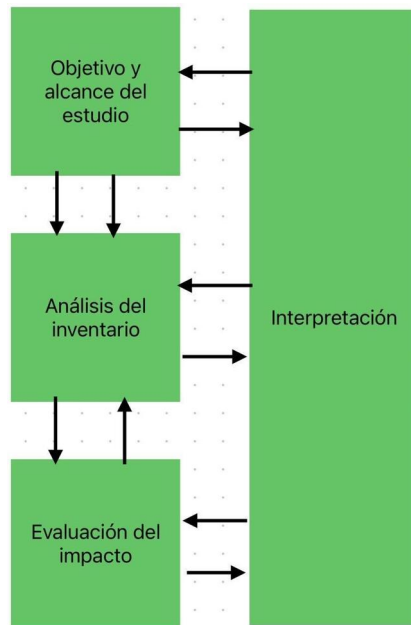


Figura 5. Fases del análisis de ciclo de vida de acuerdo a ISO 14040 (2006) (Fuente: Propia)

3.1 Definición de objetivos y alcance

Es la primera fase del ACV, en este apartado se define el tema de estudio y se incluyen los motivos que llevan a realizarlo, así como la unidad funcional y los límites del sistema de producto. La unidad funcional define la cantidad o dimensiones del producto y, por tanto, forma la base del estudio ACV. Además de la cantidad y las dimensiones, la unidad funcional considerada también puede ser el servicio prestado por el producto (Rebitzer et al., 2004).

En esta fase también se consideran siguientes puntos:

- **Sistema del producto.** Conjunto de procesos que sirven de modelo para estudiar el ciclo de vida de un producto y su representación es un diagrama de procesos interconectados entre sí.
- **Límites del sistema.** Definen los procesos del sistema del producto que se desea abordar (**Figura 6**).

- **Alcance.** Son definidos por los límites, en los ACV podemos encontrar los siguientes:
 - **De cuna a cuna:** Es cuando el producto desechado, sirve como materia prima para otro.
 - **De cuna a tumba:** El alcance cubre desde la extracción de la materia prima hasta que se desecha el producto.
 - **De cuna a puerta:** Generalmente, el alcance cubre desde la extracción hasta que sale de la fábrica.
 - **De la puerta a la puerta:** El alcance se limita a los procesos de fabricación.

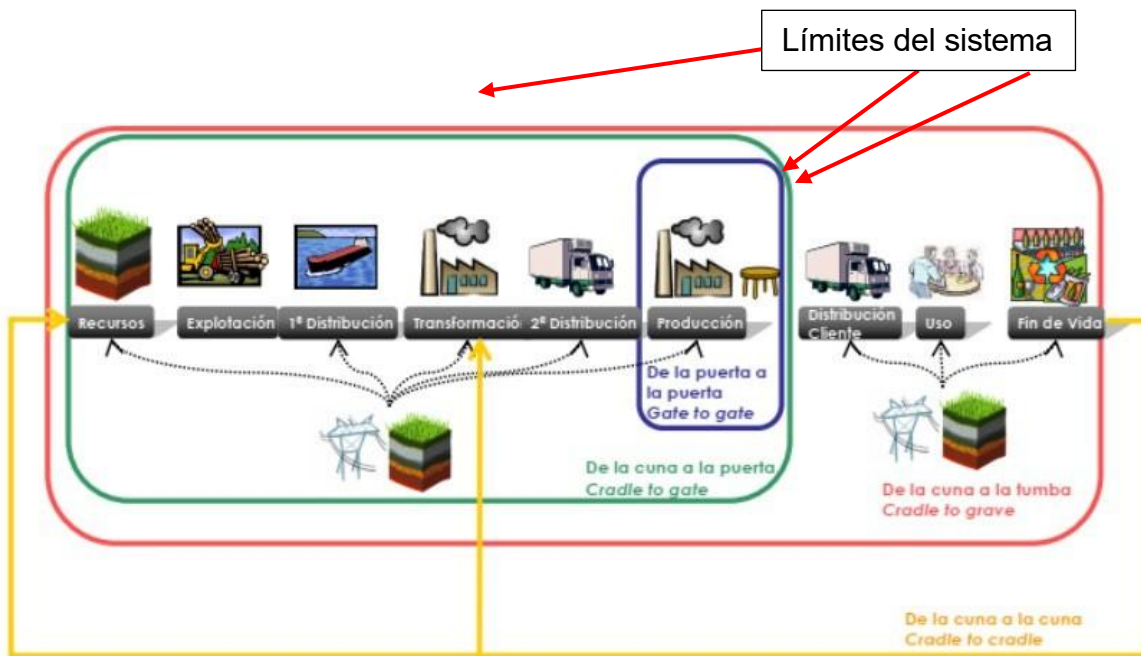


Figura 6. Límites del sistema utilizados en ACV (Fuente: Federation, s.f.).

- **Función del sistema:** Descripción de las características funcionales del producto o servicio.

- **Unidad funcional:** Es una descripción cuantitativa de la función del producto o servicios del análisis y servirá de referencia para relacionar las entradas y salidas de materia y energía en las fases del ACV (Contreras, 2018).
- **Flujo de referencia:** Son las entradas (materia y energía) y salidas (producto, coproducto, emisiones al aire, agua y suelo) que se requiere para conformar a la unidad funcional.

3.2 Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

En la etapa de análisis del ICV, se establecen los límites entre el sistema del producto y otros subsistemas (Guinee et al., 1992); esto define las relaciones entre los procesos que ocurren en un sistema dado. Los dos tipos de datos recopilados en la fase ICV son (1) primarios y (2) genéricos. Los datos primarios se toman “*in-situ*”, es decir, en el lugar, mientras que los datos genéricos se emplean cuando no es posible obtener datos primarios, utilizando conjunto de valores promedio de diferentes procesos de producción orientados a un mismo producto (Klöpffer & Grahl, 2014). Un análisis de inventario proporciona un perfil de emisiones en cada categoría, que luego se utiliza en la siguiente etapa para evaluar sus impactos en el medio ambiente. La disponibilidad y calidad de los datos son muy críticas para un estudio de ACV. Es importante utilizar indicadores de calidad y actualizar periódicamente las bases de datos con los datos más recientes y actuales para eliminar cualquier anomalía temporal que pueda comprometer el estudio (Guinee et al., 1993).

3.3 Evaluación de impacto (EICV)

Es una evaluación de los cambios ambientales identificados durante el ICV del estudio de ACV. El componente de evaluación de impacto consta en principio de los cuatro elementos siguientes: clasificación, caracterización, normalización y valoración (Jensen et al., 1997). Esto implica la evaluación de las cargas

ambientales debidas a todos los recursos y emisiones identificados en el inventario del ciclo de vida (Marano y Rogers, 2004).

3.3.1 Categorías de impacto:

Las tres categorías principales de impacto, también conocidas como áreas de protección, son el uso de recursos, las consecuencias para la salud humana y las consecuencias ecológicas. Al seleccionar las categorías de impacto se debe considerar la exhaustividad, la practicidad, la independencia y la relación con el paso de caracterización (Udo de Haes et al., 1999).

3.3.2 Clasificación:

El proceso de agrupar recursos y emisiones bajo varias categorías de impacto se conoce como clasificación. Las emisiones y los recursos extraídos se agregan utilizando el conocimiento científico con respecto a sus efectos potenciales sobre los indicadores ambientales seleccionados (Pennington et al., 2004).

3.3.3 Caracterización:

Una vez clasificados los datos recopilados, a partir de las tablas del inventario se calculan los indicadores correspondientes a cada categoría de impacto en un proceso conocido como caracterización. Consiste en relacionar cada insumo y producto con su respectiva categoría de impacto. Es un paso tanto científico como cuantitativo, que requiere la estimación de la contribución de cada insumo y producto (Jensen et al., 1997).

3.3.4 Normalización:

Después de la clasificación de los valores de los datos y el cálculo de los resultados de los indicadores, los resultados deben normalizarse con respecto a los valores de referencia; este proceso se conoce como normalización. Permite comparar valores pertenecientes a diferentes indicadores (Pennington et al., 2004).

Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental. El modelado de punto medio o “midpoint” ayuda a identificar posibles factores estresantes en un punto medio de la cadena causa-efecto. El modelado de punto final o “endpoint” calcula el impacto de cada factor estresante en un efecto final en la cadena de causa-efecto, como el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, etc. Como se muestra en la **Figura 7**, es preferible utilizar el modelado de punto final debido a su simplicidad, supuestos mínimos y cantidad reducida de pronóstico requerido (Bare et al., 2003). Sin embargo, es importante que los estudios de ACV se realicen utilizando más de un método de evaluación de impacto (Daniel et al., 2004).

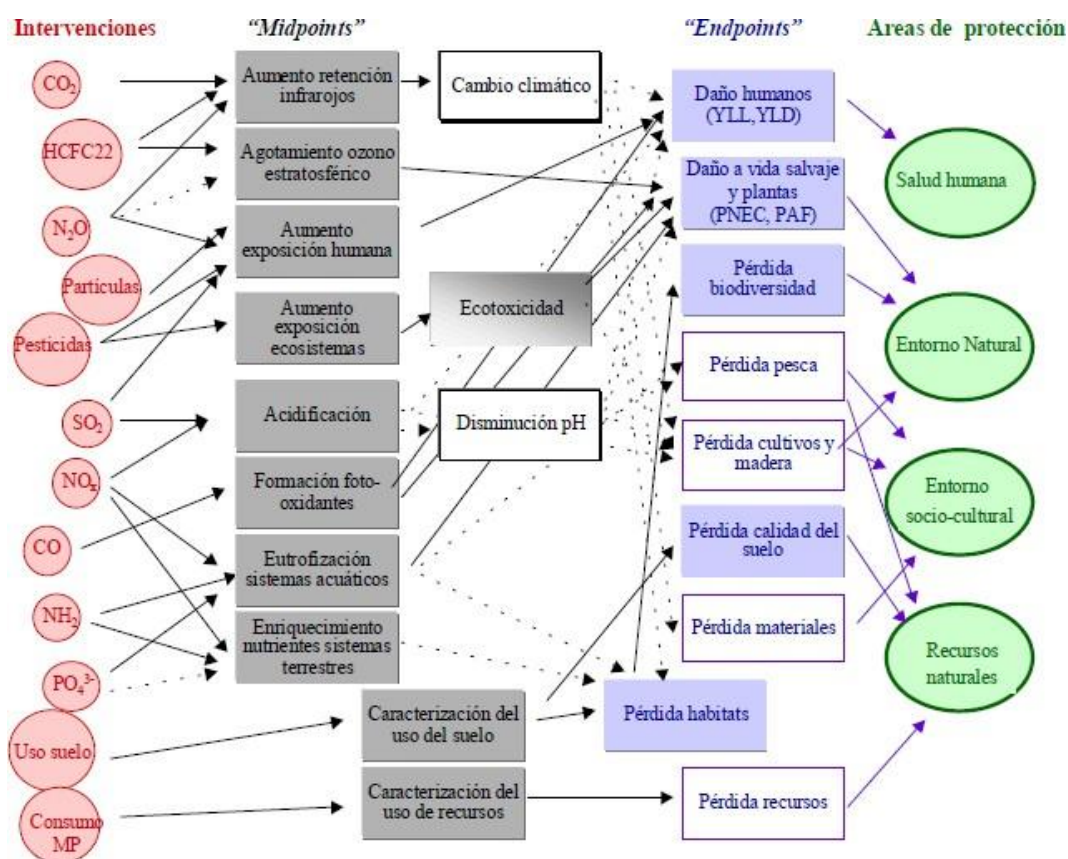


Figura 7. Esquemización de las relaciones entre intervenciones ambientales, impactos de puntos intermedios “midpoints”, impactos de puntos finales “endpoints” y áreas de Protección (Udo de Haes et al., 1999).

3.4 Interpretación

La interpretación del ciclo de vida es la cuarta etapa en un estudio de ACV, en la que los resultados del ICV y EICV se cuantifican, evalúan y comunican. Este componente del estudio incluye dos elementos: la valoración de las puntuaciones de los perfiles ambientales y el análisis de la fiabilidad de los resultados obtenidos (Guinee et al., 1993). La interpretación del ciclo de vida es un proceso que da credibilidad a los resultados obtenidos en las tres fases iniciales del estudio ACV. La calidad de los datos y los resultados pueden verse afectados por la falta de disponibilidad de datos, inconsistencias en la recopilación de datos y fuentes variables, lo que genera percepciones engañosas que conducen a una toma de decisiones incorrecta; por lo tanto, la confiabilidad de los resultados del ACV es fundamental para el estudio (Jensen et al., 1997). Un análisis de sensibilidad e incertidumbre es de suma importancia en cualquier estudio de ACV que involucre suposiciones y conclusiones. Los objetivos de la etapa son:

1. Analizar y concluir hallazgos y brindar recomendaciones sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas anteriores del estudio ACV. También es importante informar los hallazgos de manera transparente.
2. Proporcionar una presentación clara y fácilmente comprensible de los hallazgos del estudio ACV. Es importante que estos hallazgos sean consistentes con respecto al objetivo y alcance definidos en el estudio.

Los objetivos de la etapa de interpretación deben centrarse en facilitar un proceso de toma de decisiones proporcionando recomendaciones del estudio ACV (Jensen et al., 1997). Al presentar los resultados, es importante incluir y explicar los supuestos considerados durante el estudio, para permitir un fácil entendimiento y comprensión de los resultados obtenidos (Curran, 2013).

En la etapa de interpretación del ciclo de vida, si los resultados del ICV y EICV no coinciden con el objetivo y el alcance definidos, entonces se debe mejorar el análisis

y realizar cambios mediante la recopilación de datos adicionales y/o la redefinición de los límites del sistema para cumplir con los requisitos o aspiraciones del estudio ACV (Jensen et al., 1997).

4. Marco metodológico

4.1 Análisis de Ciclo de vida

Para poder hacer el análisis de los impactos del sistema de producción de una tarima, es necesario desarrollar el ACV con las etapas ya mencionadas, 1) definición y alcance de objetivos, 2) análisis de inventario, 3) evaluación de impactos, y 4) interpretación.

4.1.1 Definición y alcance de objetivos

Los objetivos del ACV como parte de esta investigación se describen a continuación:

- Realizar un estudio de análisis del ciclo de vida para determinar y comparar los impactos ambientales incurridos de la etapa “Cuna a la puerta” de una tarima de madera y plástico de 48” x 40”.
- Establecer información de referencia relativa a los requisitos de energía, recursos y las cargas ambientales causadas por los sistemas de producto/proceso que se analizan.
- Clasificar la contribución relativa de cada etapa del ciclo de vida a la carga ambiental total.

Motivación: Este estudio ACV se realizó para determinar la tarima con menor carga ambiental en su proceso de producción. Mediante una comparativa entre los inventarios de ciclo de vida y sus interpretaciones para poder enfatizar cuál de las dos es la mejor opción para el medio ambiente.

Aplicación prevista: Los resultados del ACV prueban la usabilidad de diferentes tecnologías para la generación de energía como mejores prácticas en su proceso de producción. También se pretende fundamentar por qué una tarima es mejor que la otra con base en los datos y no en el criterio personal.

Público objetivo: Los resultados del estudio ACV se presentarán en congreso AMIDIQ 2025 para su divulgación y posibles nuevos estudios en el país. Los resultados también serán puestos a disposición de los fabricantes de tarimas que colaboraron en dar sus datos, esto para ayudarlos a identificar las etapas del ciclo de vida de las tarimas que producen el máximo impacto ambiental y tomar las medidas necesarias para mitigarlas. También ayudará a los usuarios de tarimas a determinar el tipo y la opción más adecuados para reducir costos y huellas de carbono.

Afirmaciones comparativas: Las comparaciones en el estudio ACV según el tipo de material de tarima son:

- Tarima de madera tipo americana de 48" x 40" fabricado con madera de pino spp.
- Tarima de plástico HDPE 100% virgen producido mediante moldeo por inyección.

4.1.2 Definición de alcance

Esta sección describe los límites del sistema y los mapas de procesos de tarima de madera y plástico considerados en el estudio. También se proporciona una descripción detallada de la unidad funcional de los sistemas de productos.

4.1.3 Unidad Funcional

Según la ISO 14040 (2006), una unidad funcional debe estar claramente definida y ser medible, para proporcionar un punto de referencia que permita normalizar las entradas y salidas. En función de esto, y considerando el objetivo y la función del

sistema, la unidad funcional analizada en este estudio fue una tarima tipo americano.

Este tipo de tarima fue elegida como unidad funcional dada su importancia económica, nivel de producción y demanda en Norteamérica. La tarima (**Figura 8**) está conformada por 3 barrotes (**Figura 9**), 4 tablas gruesas (**Figura 10**) y 9 tablas delgadas (**Figura 11**), unidas con clavos rolados (120 clavos en total por tarima) (**Figura 12**).



Figura 8. Tarima de madera tipo americana (Fuente: Propia)



Figura 9. Tabla de la tarima llamada barrote (Fuente: Propia)



Figura 10. Tabla gruesa de la tarima (Fuente: Propia)



Figura 11. Tabla delgada de la tarima (Fuente: Propia)

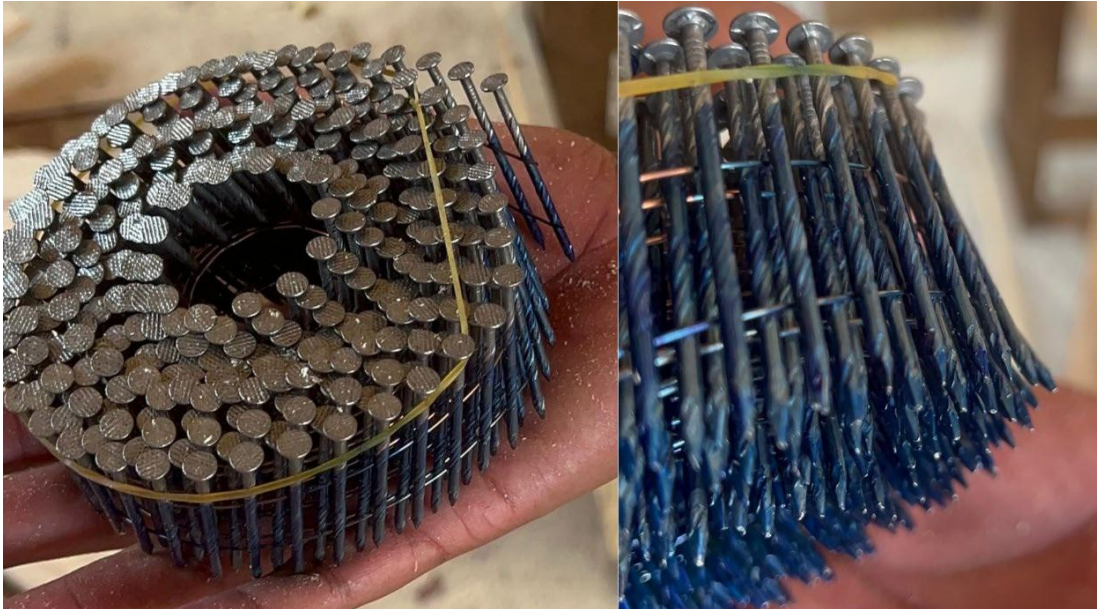


Figura 12. Clavos enrollados para tarima de madera (Fuente: Propia)

4.1.4 Límites del sistema

Los límites del sistema establecidos para esta investigación corresponden de “Cuna a la puerta” (**Figura 6**). Comercializadora de Madera y Armado de Tarima “Los Pinos” cuenta con 4 etapas:

- Extracción de materia prima
- Aserrío de madera
- Armado
- Tratamiento térmico

4.1.5 Selección de tarimas

Existe una gran variedad de tarimas, según los requisitos específicos de los clientes. Este estudio se centró exclusivamente en tarimas compartidas de 1200 mm × 1000 mm, fabricadas en madera o plástico.

Las tarimas de madera están hechas de madera verde de cortas dimensiones, exclusivamente de *Pinus* spp. del estado de Michoacán. Se trata de tarimas tipo americana, comúnmente usadas en Norteamérica.

Las tarimas de plástico son idénticas en estructura, pero varía su método de producción. Se fabrican mediante moldeo por inyección, permiten su anidamiento, ahorrando espacio. Según la literatura, las tarimas de plástico son más duraderas que las de madera, según sea su uso y las condiciones climáticas donde se encuentren. Una vez dañadas, las tarimas de plástico no pueden repararse; en este caso, se envían a reciclaje o se incineran con recuperación de energía.

4.1.6 Caracterización de tarimas de madera

El mapa del proceso describe la vida útil de las tarimas de madera donde se considera desde la extracción de la materia prima hasta la salida de la tarima del tratamiento térmico. El mapa ha sido elaborado con información recolectada en trabajo de campo (**Figura 13**).

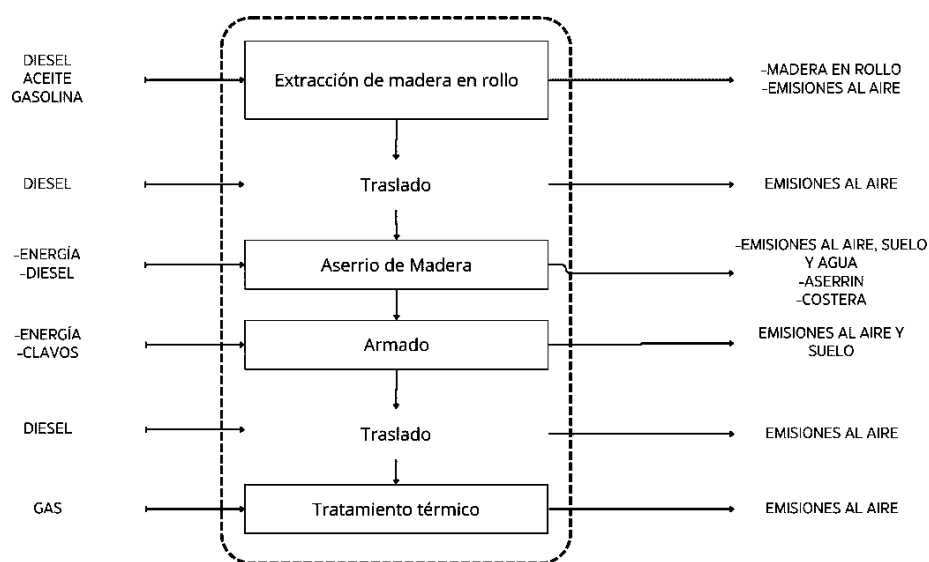


Figura 13. Mapa de proceso de una tarima de madera (Fuente: Propia)

Extracción de materias primas: Las materias primas necesarios para la fabricación de tarimas de madera son madera blanda, clavos de acero (aleación),

electricidad y combustible. Este estudio ACV considera la producción de madera de pino; sin embargo, no se considera la producción de materias primas relacionadas, como clavos de acero.

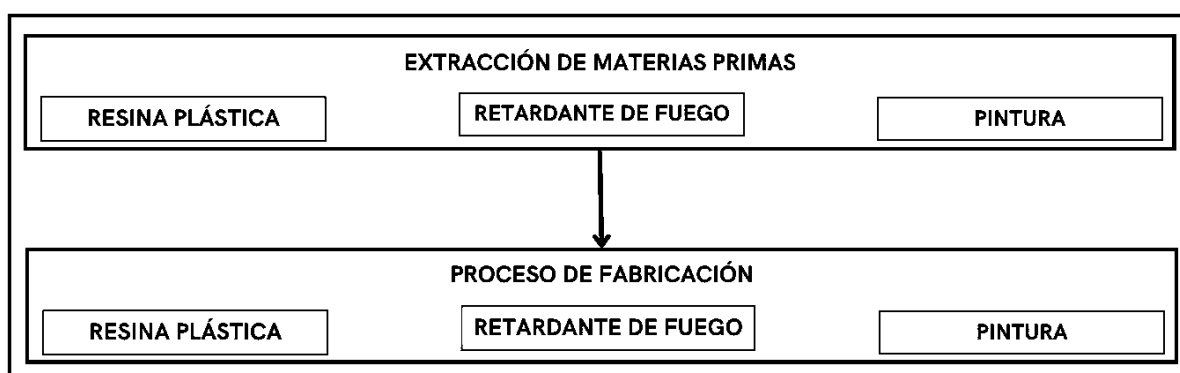
Fabricación de Tarimas de Madera: El proceso de fabricación de tarimas implica el corte de madera para producir tablas y el clavado de tablas para producir tarimas como producto final. La madera se obtiene de los aserraderos y se clasifican según su tamaño antes de utilizarlos para la producción. Se utiliza una sierra cinta para cortar la madera en tablas del tamaño requerido y es lo suficientemente eficiente para cortar madera en varias alturas y espesores. Los productos de desecho como aserrín y costera de madera producidos durante el proceso de aserrío de madera se pueden utilizar como combustible para aumentar algunos de los requisitos energéticos del proceso, o como un ingreso extra al ser vendido (CMAT, 2024). La madera cortada necesaria para cada tarima se apila en el área de madera aserrada y se envía a mesas de trabajo donde serán clavadas con pistolas neumáticas. Las personas encargadas de armar las tarimas tienen una capacidad de producir hasta 42 tarimas por hora. Las tarimas fabricadas son transportadas mediante trabajadores hasta las áreas de almacenamiento para su apilamiento. Luego, las tarimas se cargan a camiones para enviarlos al tratamiento térmico.

Tratamiento fitosanitario de tarimas: Una vez fabricadas las tarimas, se envían a una bodega donde se les aplicará el tratamiento térmico. Normalmente se cargan en camiones Torton o tráileres de plataforma con una capacidad media de 500 a 600 tarimas por viaje. A menudo se las trata para matar las plagas que infestan la madera. Estos tratamientos se conocen como tratamientos fitosanitarios. Los tratamientos fitosanitarios deben seguir las normas de la Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias (NIMF) y la NOM-144-SEMARNAT-2017. El tratamiento térmico se realiza en cámaras de calor u hornos convencionales, calentando hasta que el perfil interior del material de madera alcanza una temperatura de 56 °C, y se mantiene a esta temperatura por un período de 30 minutos (CMAT, 2017). El tratamiento térmico requiere el uso de combustibles fósiles y emite emisiones

nocivas a la atmósfera. Uso de tarimas: una vez tratadas las tarimas se ponen a disposición del cliente el cual puede ir por ellas a la bodega o pueden ser enviadas directo hasta donde lo requiera (CMAT, 2024).

4.1.7 Caracterización de tarimas de plástico

El mapa de proceso describe el ciclo de vida de Las tarimas de plástico de esta investigación y sus límites. Este mapa de procesos ha sido adaptado del estudio de ACV realizado para Las tarimas de plástico compartidos por *IGPS Tarima Company* y *Environmental Resources Management* (ERM, 2008).



Mapa 2. Mapa de proceso de tarima de plástico (Fuente: Propia)

Extracción de Materias Primas: Las tarimas de plástico se utilizan cada vez más debido a que son completamente reciclables, resistentes al ataque de plagas (por lo que no requieren tratamiento fitosanitario), tienen una larga vida útil, y son livianos, lo que los hace más convenientes para fines de transporte.

Las materias primas utilizadas en la producción de Tarimas de plástico incluyen resina de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) 100% virgen, acero, electricidad y otras fuentes de combustible para satisfacer los requerimientos energéticos. Las materias primas para la producción de resina HDPE son petróleo crudo y gas natural (TMF Corporation, 2007).

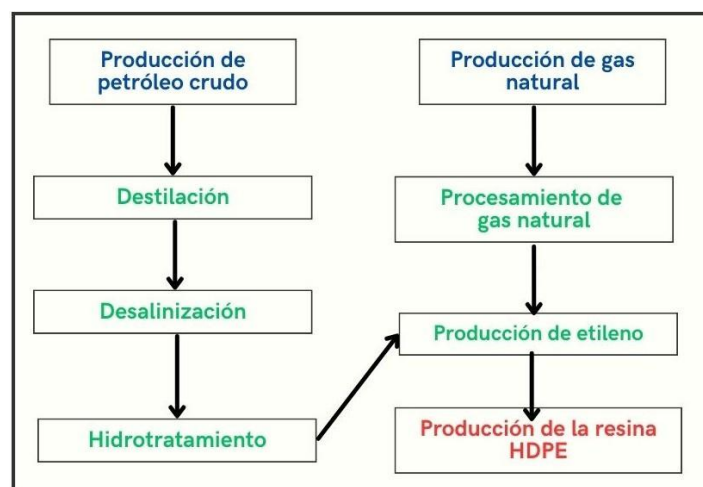
El HDPE es un tipo de poliolefina producido a partir de monómeros de olefina (alqueno). Estos monómeros poseen un enlace doble reactivo que se combina con

miles de otras unidades de monómero para formar polímeros. El monómero utilizado en la producción de HDPE es el etileno. Comonómeros como el butano y el hexano se emplean para ajustar la densidad y otras propiedades físicas del producto.

Los dos coproductos generados durante la producción de HDPE son los gases de combustión y los gases residuales. Los dos métodos principales de producción de la resina HDPE son la polimerización en suspensión y la polimerización en fase gaseosa.

Polimerización en Suspensión: La resina de HDPE se produce utilizando un medio de hidrocarburo saturado, con temperaturas ajustadas entre 70 y 110 °C y una presión mantenida baja, entre 1 y 5 MPa. El polímero se forma como una suspensión o lechada, de ahí el nombre del proceso. Una vez formado, el polímero se separa del medio y se mezcla con estabilizadores antes de ser extruido en pellets de HDPE (HDPE, 2008).

Polimerización en Fase Gaseosa: Este proceso utiliza un reactor en fase gaseosa que contiene un lecho fluidizado compuesto por partículas secas de polímero, agitadas a altas velocidades. Las presiones se mantienen aproximadamente en 2 MPa y las temperaturas oscilan entre 70 y 110 °C. El material resultante se extruye posteriormente en tarimas (HDPE, 2008).



Mapa 3. Producción de resina HDPE (Fuente: Propia)

Fabricación de Tarimas de Plástico:

Las tarimas de plástico se fabrican a partir de diversos tipos de resinas, como polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), entre otros. Los métodos utilizados para producir los moldes incluyen moldeo por inyección, moldeo rotacional, termoformado, etc. El moldeo rotacional se utiliza típicamente en el caso de las resinas LDPE (HuaDing, 2023).

El HDPE se procesa mediante la técnica de moldeo por inyección para producir un molde que luego se transforma en la forma de una tarima de plástico. Durante el proceso, también se hace pasar un flujo de gas NO₂ a través del molde. El proceso completo generalmente toma de 2 a 3 minutos por tarima (HuaDing, 2023). La tarima fabricada pasa posteriormente por un estabilizador UV diseñado para mejorar su vida útil. Además, se recubre con un retardante de fuego, que consiste esencialmente en una resina de melamina formaldehído.

4.1.8 Alcance y límites del sistema

Los límites del sistema definen el alcance hasta el cual se investigan los impactos ambientales en el ciclo de vida de un producto. Estos límites determinan qué procesos deben incluirse en el ACV. La definición de los límites del sistema se lleva a cabo durante la fase de alcance de un ACV.

Los límites del sistema para los sistemas de la tarima de madera y plástico se detallan a continuación:

Tarimas de Madera:

El límite del sistema para el ACV incluye los siguientes procesos:

- Extracción de la madera en rollo necesaria para la fabricación de tarimas de madera.

- Todas las etapas de fabricación de la tarima de madera, como el aserrío de la madera y el clavado.
- Proceso de tratamiento fitosanitario de las tarimas de madera que son para el mercado de exportación.

Tarimas de Plástico:

El límite del sistema para el ACV incluye los siguientes procesos:

- Extracción de materias primas, como la resina plástica, hasta la planta de fabricación.
- Etapas de fabricación, que incluyen la preparación del molde, la coloración y la estabilización UV.

Exclusiones:

Del límite del sistema se excluyeron los siguientes procesos:

- Todos los procesos utilizados para fabricar componentes individuales de las tarimas.
- Fabricación y mantenimiento de equipos fitosanitarios y otros equipos de capital.
- Transporte de tarimas y cualquier otro movimiento dentro de las instalaciones del aserradero o el centro de distribución.

Sistema de Producto

El sistema de producto analizado en este estudio es una tarima fabricada con material de madera o plástico. Las etapas del ciclo de vida analizadas en el estudio

son: (1) Extracción de materia prima, (2) Aserrío de madera, (3) Armado y (4) Tratamiento térmico.

Las funciones del sistema de producto se detallan a continuación:

El sistema de producto analizado en este estudio es una tarima fabricada de madera o plástico.

- Las tarimas de madera requieren tratamiento para eliminar las plagas que puedan estar presentes; sin embargo, las tarimas de plástico no necesitan ser tratados. El método de tratamiento más utilizado es tratamiento térmico.
- Cada sistema de producto (madera/plástico) está diseñado para transportar mercancías desde los distribuidores hasta los mayoristas y/o minoristas.
- Cada tarima (madera/plástico) tiene una vida útil determinada, después de la cual sufre daños y necesita ser reparado o desechado.

Unidad Funcional:

Al determinar la unidad funcional para un estudio de ACV que compare sistemas de productos, la base de comparación debe ser el servicio proporcionado por el sistema de producto. En este estudio de ACV, la unidad funcional es una tarima de madera/plástico. Por lo tanto, para la extracción, fabricación y tratamiento, se comparan los impactos ambientales generados por la producción de una tarima de madera y plástico.

Procedimientos de Asignación:

La mayoría de los sistemas de productos generan más de un producto; estos se conocen como coproductos. El proceso de dividir las cargas ambientales entre todos los coproductos para determinar la contribución exacta de las materias primas y los

recursos al producto principal se conoce como asignación. La ISO recomienda los siguientes métodos de asignación para un estudio de ACV:

- Evitar la asignación dividiendo el proceso en múltiples subprocesos, cada uno produciendo un coproducto particular, y considerando únicamente el subproceso que produce el producto principal que se está estudiando.
- Ampliar los límites del sistema para incluir los coproductos de tal manera que, si el coproducto puede reutilizarse en el sistema, su carga ambiental pueda deducirse de la carga ambiental total del sistema. Estos coproductos serán conocidos como "coproductos evitados".
- Asignar la carga ambiental en función de la causalidad física de los outputs, como la masa o el contenido energético.
- La ISO también recomienda la asignación basada en el valor económico, conocida como asignación socioeconómica. Por ejemplo, si un coproducto genera el 30% del valor del producto final, entonces se le asigna el 30% de la carga ambiental a este coproducto.
- En este estudio de ACV, la asignación sigue el segundo y tercer punto mencionados anteriormente. Durante la fabricación de tarimas de madera, se genera aserrín y otros desechos de madera, que a menudo se utilizan como combustible en las instalaciones de fabricación, reemplazando la necesidad de comprar otros insumos fuera del sitio para satisfacer las necesidades de combustible. Además, el aserrín se produce como un subproducto en un porcentaje por masa del total de madera utilizada, por lo que se utiliza la asignación por masa para separar las cargas ambientales de los coproductos.

4.1.9 Requerimientos de información

Se siguieron los siguientes criterios para la recopilación de datos en el estudio de ACV:

- **Datos de primera mano y recientes** provenientes de expertos, relacionados con el consumo de recursos y las emisiones en cada etapa del sistema de producto.
- **Enfoque en la recopilación de datos de las industrias de tarimas plástico**, sin limitarse a un tipo específico de empresa, instalación de fabricación u operación.
- **Mayor énfasis en los datos** de áreas geográficas como América del Norte debido al uso global de las tarimas en logística.

Basándose en los criterios anteriores, se eligieron los siguientes métodos de evaluación de impacto del software *SimaPro* para el estudio.

SimaPro: Es un software especializado en el ACV que permite evaluar el impacto ambiental de productos y procesos a lo largo de su ciclo de vida. Desarrollado por *PRé Sustainability*, este programa es ampliamente utilizado en industrias, investigación y consultoría para modelar cadenas de suministro, realizar evaluaciones ambientales y apoyar la toma de decisiones sostenibles (PRé Sustainability, 2024). *SimaPro* integra diversas bases de datos y metodologías de ACV, como Eco-indicador 99 y ReCiPe, para proporcionar análisis detallados y comparativos.

Versión de *SimaPro* utilizado: v9.3.0.3.

Eco-Indicator 99: El Eco-indicador 99 es un método de evaluación de impacto ambiental dentro del ACV que permite medir y comparar los efectos ambientales de

productos y procesos a lo largo de su vida útil. Este método se basa en una única puntuación agregada derivada de categorías de impacto como daño a la salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos (Goedkoop & Sprinsema, 2001). Su enfoque facilita la toma de decisiones en diseño ecológico y producción sostenible.

4.2 Inventario de Ciclo de Vida

La recopilación de datos para el estudio de ACV se realizó en estrecha referencia a los diversos procesos involucrados en cada etapa del ciclo de vida de las tarimas de madera, en el caso de las tarimas de plástico se utilizaron datos de artículos de revistas científicas. Las fuentes de datos utilizadas en el estudio incluyen bases de datos del software *SimaPro* v9.3.0.3, artículos de revistas científicas publicados y datos de procesos similares de empresas fabricantes de tarimas. La recopilación de datos se enfocó específicamente en las tarimas tipo americano de 48" x 40".

4.2.1 Inventario del Ciclo de Vida de una Tarima de Madera

Se realizó una recolección exhaustiva de datos de las primeras etapas del ciclo de vida para mantener la calidad de los resultados y la responsabilidad (**Tabla 2**).

4.2.2 Extracción de madera en rollo

El inventario del ciclo de vida para la extracción de la madera en rollo se realizó tomando la distancia del lugar donde se realizó la corta de los árboles hasta el aserradero. Una vez que llega se hace un cálculo del coeficiente de apilamiento para determinar cuanta madera es la que se recibe.

Los troncos deben ser cortas dimensiones y deben tener un mínimo de 15 cm de diámetro, y tener los permisos de aprovechamiento de forestal. Una vez que se inspecciona esta primera etapa se clasifican la troza por tamaños para poder determinar cuáles troncos se pueden utilizar para las diferentes tablas que se utilizan en la tarima.

La empresa utilizó:

- **Diésel** para el transporte de la tarima al aserradero mediante camiones tipo rabones.

4.2.3 Aserrío de madera

Una vez que se clasificaron las trozas se pasan por sierras cintas, aquí es donde se generan los residuos de aserrín y costera. Al momento de pasar la madera por las sierras se comienzan a separar de acuerdo a los diferentes tamaños de tabla que se utiliza para la tarima y se apilan en montones del mismo tamaño para que en el área de armado se puedan tomar fácilmente.

El aserrín y la costera son residuos a los cuales se les da un valor económico, el aserrín algunas ocasiones se utilizan como combustible, y la costera como base para estructura de frutas y verduras.

La empresa utilizó:

- **Diésel** para la lubricación de las sierras cintas en el aserrío de la madera.

4.2.4 Armado de tarimas

El inventario del ciclo de vida para la fabricación de pallets se obtuvo de una empresa de tarimas en la localidad de Santa Clara del Cobre municipio de Salvador Escalante, Michoacán. Se recopilaron y analizaron datos relacionados con la cantidad de energía y los insumos materiales necesarios para fabricar una tarima.

La empresa utilizó:

- **Gas natural y electricidad** para fabricar tarimas de madera.

En el armado de una tarima de madera se consideraron **9 tablas delgadas, 5 tablas gruesas, 3 barrotes y 120 clavos de aleación de acero**. La tarima tiene las siguientes especificaciones (**Figura 14**).

- **Entrada:** Cuatro vías
- **Ancho:** 40 pulgadas
- **Largo:** 48 pulgadas
- **Carga estática máxima:** 4,500 Kg
- **Carga dinámica máxima:** 1,500 Kg



Figura 14. Especificaciones en medidas de tarima (Fuente: Propia).

4.2.5 Tratamiento Térmico de Tarimas:

El tratamiento térmico de tarimas de madera se realiza en cámaras de tratamiento térmico. Los datos relacionados con este proceso se obtienen de empresas especializadas en el tratamiento térmico de tarimas, donde el combustible utilizado es mayormente gas natural.

La capacidad de la cámara es de 100 tarimas de tipo 48" x 42". Las tarimas se colocan dentro de la cámara con ayuda de los trabajadores.

Tabla 2. Inventario de Ciclo de Vida de una tarima de madera.

Proceso	Tipo	Material	Cantidad	Unidad
Extraccion de madera en rollo	Input	Diesel	0.625	L
		Sierras (Tungstenoo/Acero)		3 Kg
		Aceite	0.003496503	L
		Gasolina	0.01048951	L
	Output	Madera en rollo		50 Kg
		Ramas (madera)		50 Kg
	Aire	CO2 (D. traslado)	0.121333333	Kg
		SOx	0.0000756	Kg
		NOx	0.0043	Kg
		CO	0.1232	Kg
Aserrio	Input	Madera en rollo		50 Kg
	Output	Madera aserrada		25 Kg
		Aserrin (madera)		12.5 Kg
		Costera (madera)		12.5 Kg
		CO2 (G. Extra)	0.024125874	Kg
Armado	Input	Tablas de madera delgada		9 Kg
		Tablas de madera gruesa		8 Kg
		Barrote (madera)		7.5 Kg
		Clavos (Acero)	0.333	Kg
		Diesel	0.0036	L
		Basura solida	0.0066	Kg
	Output	Tarima		1 p
	Energia	Eolica	0.27	KWh
		Fotovoltaica	1.03	KWh
		Biomasa	0.0003	KWh
		Carboelectrica	0.2522	KWh
		Ciclo combinado	3.9498	KWh
		Combustion interna	0.0594	KWh
		Geotermoelectrica	0.0663	KWh
		Hidroelectrica	0.3213	KWh
		Nucleoelectrica	0.1204	KWh
		Termica convencional	0.5726	KWh
		Turbo gas	0.3562	KWh
Tratamiento Térmico	Input	Tarima		22 Kg
		Gas		3.5 L
		Electricidad	12.9341	kWh
	Output	Tarima		13 Kg

4.3 Inventario del Ciclo de Vida de una Tarima de Plástico

En el ciclo de vida de las tarimas de plástico, los impactos ambientales más significativos ocurren durante la producción de resina de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) y el transporte de las tarimas de plástico. La resina HDPE se produce a partir de petróleo crudo y otros materiales básicos, incluidos gas natural y petróleo.

La producción de tarimas de plástico HDPE se realiza mediante un proceso de moldeo por inyección. En comparación con el transporte de tarimas de madera, el transporte de tarimas de plástico genera una mayor carga ambiental debido a la menor cantidad de estaciones de fabricación y centros de recolección de tarimas de plástico.

4.3.1 Producción de Resina HDPE

El inventario del ciclo de vida para la producción de resina HDPE se obtiene del informe *“Cradle-To-Gate Life Cycle Inventory of Nine Plastic Resins and Two Polyurethane Precursors – Revised Final Report”* (Franklin Associates, 2009). Los datos fueron recopilados de tres principales productores de HDPE en América del Norte.

Los materiales básicos utilizados son gas natural y petróleo. Las principales fuentes de energía utilizadas para el transporte son combustibles derivados del petróleo, junto con otras fuentes de energía como hidroeléctrica, carbón, energía nuclear y combustibles derivados de la madera para satisfacer las necesidades energéticas del proceso.

4.3.2 Fabricación de Tarimas de Plástico – Moldeo por Inyección

Las tarimas de plástico se fabrican mediante el proceso de moldeo por inyección. El inventario del ciclo de vida del moldeo por inyección se obtiene del estudio de

Thiriez y Gutowski (2006). Los autores analizaron tres tipos de inyectoras: hidráulicas, híbridas y totalmente eléctricas.

El polímero HDPE se envía primero a un compuesto con un valor de consumo específico de energía (SEC) de 5.51 MJ/kg, con emisiones totales de 296.35 g/kg de material procesado (**Figuras 15 y 16**).

La tarima de plástico fabricada tiene las siguientes especificaciones (TMF Corporation, 2009).

Especificaciones:

- **Entrada:** Cuatro vías
- **Ancho:** 40 pulgadas
- **Largo:** 48 pulgadas
- **Carga estática máxima:** 3,400 Kg
- **Carga dinámica máxima:** 1,400 Kg

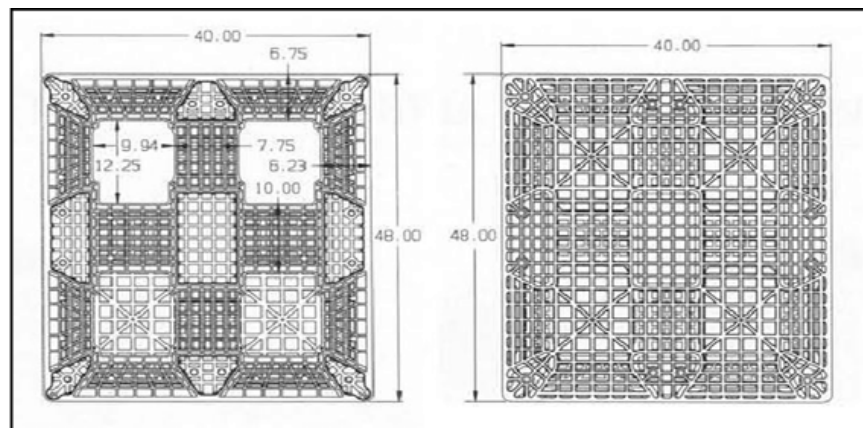


Figura 11. Dimensiones de frente y detrás de la tarima de plástico (Anil Philip, 2010)

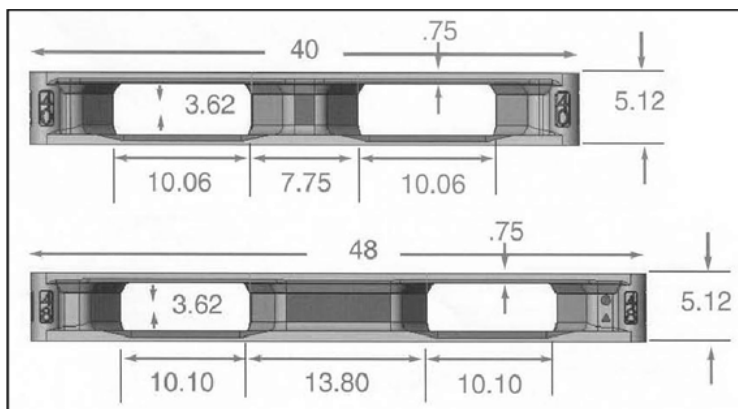


Figura 12. Dimensiones de los costados (Anil Philip, 2010)

Tabla 3. Inventario de Ciclo de Vida de una tarima de plástico (Milota, M. et al, 2005)

Proceso	Tipo	Material	Cantidad	Unidad
Energía	Output	Resina HDPE (Hecho en EUA)	1	Kg
	Input	Gas Natural	57.8	MJ
		Petróleo	12.4	MJ
		Carbón	2.48	MJ
		Energía hidroeléctrica	0.11	MJ
		Nuclear	0.59	MJ
		Otros	0.12	MJ

		Energía recuperada	4.58	MJ
Emisiones sólidas	Emisiones	Relleno sanitario	32.1	g
		Incineración	3.82	g
		WTE	0.027	g
Emisiones atmosféricas	Emisiones	CO2 (fósil)	1.057	Kg
		Metano	415	g
		Óxido nitroso	6.33	g
		Bromuro de metilo	2.0E-08	g
		Cloruro de Metilo	2.1E-07	g
		Tricloroetano	4.1E-06	g
		Cloroformo	4.4E-08	g
		Cloruro de metileno	2.8E-04	g
		Tetracloruro de carbono	1.7E-04	g
		CFC-012	3.8E-04	g
		HCFC/HFC	0.0017	g
Emisiones de agua	Emisiones	Bario	2.81	g
		DBO	1.09	g
		Bromuro	1.34	g
		Calcio	20.1	g
		Cloruros	226	g
		COD	1.85	g
		Sólidos disueltos	279	g
		Dureza	61.9	g
		Litio	5.54	g
		Magnesio	3.93	g
		Metal	18.7	g
		Aceite	0.13	g
		Sodio	63.7	g
		Estroncio	0.34	g
		Sulfatos	0.51	g
		Sólidos suspendidos	6.35	g
	Output	Moldeo de inyección de resina HDPE	1	Kg

Materia prima	Input	Resina HDPE	1.006	Kg
Emisiones de aire		Electricidad	1.492	MJ
		Dióxido de Carbono	400	g
		Dióxido de sulfuro	2.06	g
		Óxido de Nitrógeno	0.84	g
		Metano	16.92	g
		Mercurio	0.01	g

4.3.3 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

Se realizó un ACV de tarimas de madera y plástico para calcular los impactos ambientales de ambos tipos. Las evaluaciones se llevaron a cabo utilizando el método Eco-Indicator 99 en la herramienta *SimaPro* v9.3.0.3 de ACV. Las categorías de impacto ambiental seleccionadas para el estudio fueron:

1. **Calentamiento global:** Fenómeno de aumento de la temperatura media de la Tierra debido a la propiedad de la atmósfera de reflejar ciertas radiaciones de vuelta a la Tierra. Este fenómeno puede intensificarse por las emisiones de gases de efecto invernadero como vapor de agua, dióxido de carbono, metano y ozono.
2. **Destrucción de la capa de ozono:** Declive gradual y constante de la capa protectora de ozono debido a su destrucción catalítica por átomos de halógeno como cloro y bromo. La destrucción del ozono conduce a la formación de agujeros en la capa de ozono, permitiendo que niveles más altos de radiaciones UV dañinas ingresen a la atmósfera, afectando la piel humana y los cultivos agrícolas.
3. **Acidificación:** Fenómeno por el cual la emisión de ácidos y sus compuestos a la atmósfera eventualmente se depositan en el suelo y el agua, aumentando la acidez en el ambiente. Esto afecta negativamente a la

vegetación y la vida acuática, además de acelerar la corrosión de edificios y metales.

4. **Eutrofización:** Incremento gradual y drástico de nutrientes químicos en un ecosistema, causado por la liberación de aguas residuales y fertilizantes, lo que aumenta su productividad primaria. La eutrofización excesiva provoca proliferaciones densas de algas y bacterias que afectan negativamente la vida acuática y otras poblaciones animales en el ecosistema.
5. **Salud humana y toxicidad:** Se refiere al impacto total en la salud humana debido a las emisiones del sistema de productos en aire, suelo y agua. Cuando sustancias no biodegradables alcanzan concentraciones elevadas en la atmósfera, los tóxicos producidos afectan negativamente a los humanos y a los ecosistemas. La complejidad de los químicos presentes en el ambiente aumenta la dificultad en la modelización de la toxicidad.
6. **Agotamiento de recursos:** Se refiere a la cantidad de minerales y combustibles fósiles utilizados por el sistema de productos. Se mide mediante el factor de caracterización denominado potencial de agotamiento de recursos.

4.3.4 Cálculo de la Huella de Carbono

La huella de carbono es la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos durante un proceso específico en un período de tiempo determinado. Estos gases absorben la radiación y reflejan la radiación infrarroja térmica de regreso a la superficie terrestre.

Los principales gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera de la Tierra son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y el ozono.

La huella de carbono se cuantifica utilizando un indicador conocido como Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), que se define como “la relación entre el calor atrapado por una unidad de masa de un gas de efecto

invernadero y el calor atrapado por una unidad de masa de CO₂ en un período de tiempo determinado” (EPA, 2009).

5. Resultados y Discusión

Este capítulo analiza los resultados del ACV realizados en las tarimas de madera y plástico. Como paso final en este estudio de ACV, la discusión incluirá la interpretación de los resultados de la evaluación de impactos.

Los resultados de la evaluación de impactos están directamente relacionados con la mejora de productos y procesos para reducir los impactos ambientales. El método de evaluación de impacto utilizado fue Eco Indicator 99.

5.1 Evaluación de ciclo de vida de tarimas de madera.

Esta sección presenta los resultados del análisis de ciclo de vida de las tarimas de madera. Las cuatro etapas involucradas son extracción, aserrío, armado y tratamiento térmico.

Los datos para el análisis fueron proporcionados por un fabricante de tarimas ubicados en el municipio de Salvador Escalante en la localidad de Santa Clara del Cobre en Michoacán, México. El material considerado en el estudio es madera blanda de *Pinus spp.*, y la tarima analizada es una tarima de madera tipo americana con dimensiones de 48" x 40".

Según los resultados, una tarima de madera produce 133.62 kg eq. de CO₂. Además, impacta en la ecotoxicidad terrestre y la toxicidad acuática, con valores de 444.69 kg 1,4-DCB en suelo y 144.11 kg 1,4-DCB en agua, respectivamente (**Tabla 4**). Esto se debe principalmente al procesamiento de la madera blanda y al secado de la madera verde.

Tabla 4. Resultados de la evaluación de impacto usando Eco Indicador 99.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>
<i>Calentamiento global</i>	kg CO ₂ eq	133.6253

<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	kg CFC11 eq	6.48E-05
<i>Radiación ionizante</i>	kBq Co-60 eq	4.684063
<i>Formación de ozono, salud humana</i>	kg NO _x eq	0.70951
<i>Formación de partículas finas</i>	kg PM2.5 eq	0.110106
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>	kg NO _x eq	0.720804
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq	2.158082
<i>Eutrofización del agua dulce</i>	kg P eq	0.336689
<i>Eutrofización marina</i>	kg N eq	0.115401
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DCB	444.6888
<i>Ecotoxicidad del agua dulce</i>	kg 1,4-DCB	144.111
<i>Ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4-DCB	38.54939
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	0.806869
<i>Toxicidad no cancerígena humana</i>	kg 1,4-DCB	172.8987
<i>Uso del suelo</i>	m ² a crop eq	9.906227
<i>Escasez de recursos minerales</i>	kg Cu eq	30.64574
<i>Escasez de recursos fósiles</i>	kg oil eq	30.02811
<i>Consumo de agua</i>	m ³	1.371537

Extracción de materia prima:

En esta etapa, se consideró el consumo de diésel, sierras, aceite y gasolina asociados a la maquinaria forestal y los camiones de traslado. Además, se contabilizaron las emisiones atmosféricas generadas, principalmente CO₂, NO_x y material particulado (**Tabla 5**).

Aserrío:

Durante la transformación de la madera en rollo en tablas delgadas, tablas gruesas y barrotes, se analizaron los consumos energéticos en equipos de corte y las pérdidas de material en forma de aserrín y costera. Se incluyeron también las emisiones generadas por el uso de combustibles en la maquinaria (**Tabla 6**).

Armado:

En este proceso, los componentes de madera son ensamblados mediante clavado,

por lo que se consideró el uso de insumos auxiliares como clavos y diésel. Asimismo, se evaluó el consumo energético de las herramientas neumáticas y el impacto ambiental del material residual generado (**Tabla 7**).

Tratamiento térmico:

Para cumplir con normativas fitosanitarias, las tarimas son sometidas a un proceso de tratamiento térmico en cámaras de calentamiento controlado. Se cuantificó el consumo energético requerido para alcanzar la temperatura interna mínima de 56°C durante al menos 6 horas, así como las emisiones generadas por el consumo de gas y energía utilizado. Los datos obtenidos en esta fase de inventario permiten un análisis detallado de los impactos ambientales, cuyos resultados son presentados en las siguientes secciones (**Tabla 8**).

Tabla 5. Resultados de evaluación de impacto de extracción de materia prima.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Roundwood</i>	<i>Diesel</i>	<i>Gasoline</i>	<i>Lubricating oil</i>	<i>Tungsten carbide</i>
<i>Carcinógenos</i>	DALY	7.54E-05	0	5.35E-10	1.39E-11	3.03E-11	7.54E-05
<i>Resp. orgánicos</i>	DALY	2.32E-09	0	1.62E-11	5.02E-13	1.82E-12	2.3E-09
<i>Resp. inorgánicos</i>	DALY	6.53E-06	7.63E-09	5.5E-09	7.65E-11	8.72E-11	6.52E-06
<i>Cambio climático</i>	DALY	3.84E-07	1.3E-09	1.09E-09	1.78E-11	1.83E-11	3.81E-07
<i>Radiación</i>	DALY	2.61E-09	0	5E-11	0	3.76E-13	2.56E-09
<i>Capa de ozono</i>	DALY	1.74E-10	0	7.42E-12	2.26E-17	4.18E-14	1.66E-10
<i>Ecotoxicidad</i>	PAF*m2yr	21.82461	0	0.001926	5.43E-06	3.39E-05	21.82264

<i>Acidificación/ Eutrofización</i>	PDF*m2yr	0.31020 6	0.000491	0.00016 3	3.37E-06	1.66E-06	0.309547
<i>Uso del suelo</i>	PDF*m2yr	0.10892 6	0	0.00034 8	0	2.59E-06	0.108575
<i>Minerales</i>	MJ surplus	0.20058 1	0	4.15E- 05	0	2.59E-06	0.200537
<i>Combustibles fósiles</i>	MJ surplus	1.53555 4	0	0.07693 5	0.001151	0.000526	1.456942

Tabla 6. Resultados de evaluación de impacto de aserrio.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Sawnwood</i>	<i>Roundwood</i>
<i>Carcinógenos</i>	DALY	6.02E-08	0	6.02E-08
<i>Resp. orgánicos</i>	DALY	3.03E-09	0	3.03E-09
<i>Resp. inorgánicos</i>	DALY	4.64E-06	0	4.64E-06
<i>Cambio climático</i>	DALY	5.69E-07	5.07E-09	5.64E-07
<i>Radiación</i>	DALY	0	0	0
<i>Capa de ozono</i>	DALY	9.6E-14	0	9.6E-14
<i>Ecotoxicidad</i>	PAF*m2yr	0.024175	0	0.024175
<i>Acidificación/ Eutrofización</i>	PDF*m2yr	0.200424	0	0.200424
<i>Uso del suelo</i>	PDF*m2yr	0	0	0
<i>Minerales</i>	MJ surplus	0	0	0

Combustibles fósiles	MJ surplus	4.938034	0	4.938034
-------------------------	------------	----------	---	----------

Tabla 7. Resultados de evaluación de impacto de armado.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Pallet	Sawnwood	Sawnwood	Wood waste	Steel	Diesel
Carcinógenos	DALY	3.04E-07	0	2.17E-08	1.92E-08	5.46E-08	2.08E-07	1.83E-10
Resp. orgánicos	DALY	1.43E-08	0	1.09E-09	9.68E-10	1.06E-08	1.59E-09	5.49E-12
Resp. inorgánicos	DALY	7.22E-06	0	1.67E-06	1.48E-06	2.92E-06	1.15E-06	2.05E-09
Cambio climático	DALY	1.22E-06	0	2.05E-07	1.82E-07	6.88E-07	1.47E-07	3.66E-10
Radiación	DALY	8.9E-10	0	0	0	0	8.73E-10	1.68E-11
Capa de ozono	DALY	3.79E-11	0	3.46E-14	3.07E-14	3.92E-14	3.53E-11	2.5E-12
Ecotoxicidad	PAF*m ² yr	0.823139	0	0.008703	0.007736	0.093342	0.712585	0.000773
Acidificación/ Eutrofización	PDF*m ² yr	0.22255	0	0.072153	0.064136	0.074876	0.011325	6.11E-05
Uso del suelo	PDF*m ² yr	0.012029	0	0	0	0	0.011915	0.000115
Minerales	MJ surplus	0.150061	0	0	0	0	0.150048	1.28E-05
Combustibles fósiles	MJ surplus	9.372294	0	1.777692	1.580171	5.583108	0.405497	0.025825

Tabla 8. Resultados de evaluación de impacto de tratamiento térmico.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Pallet	Heat	Electricity
Carcinógenos	DALY	8.11E-07	1.64E-07	1.02E-07	5.44E-07
Resp. Orgánicos	DALY	1.01E-08	7.73E-09	5.97E-10	1.76E-09
Resp. Inorgánicos	DALY	8.96E-06	3.9E-06	8.05E-07	4.25E-06
Cambio climático	DALY	1.53E-06	6.61E-07	8.78E-09	8.56E-07
Radiación	DALY	1.13E-08	4.81E-10	2.41E-10	1.06E-08

<i>Capa de ozono</i>	DALY	3.29E-10	2.05E-11	5.19E-12	3.04E-10
<i>Ecotoxicidad</i>	PAF*m ² yr	1.187349	0.445024	0.140213	0.602112
<i>Acidificación/ Eutrofización</i>	PDF*m ² yr	0.180368	0.12032	0.008568	0.05148
<i>Uso del suelo</i>	PDF*m ² yr	0.133084	0.006504	0.110093	0.016487
<i>Minerales</i>	MJ surplus	0.090597	0.081129	0.00141	0.008058
<i>Combustibles fósiles</i>	MJ surplus	11.79426	5.067062	0.051017	6.676182

Se determinó que, la etapa del proceso con menor impacto ambiental corresponde al armado de la tarima, mientras que la fase con mayor impacto se asocia a la extracción de la madera en rollo (**Figura 17**). Este resultado se debe, en gran medida, al uso de insumos en la maquinaria forestal, particularmente a las sierras de tungsteno con dientes de corte de acero especial cromado mediante electrólisis y remaches endurecidos. Cabe destacar que dichas sierras son importadas desde Suiza hasta México, lo que contribuye adicionalmente a la carga ambiental del proceso debido a los impactos asociados al transporte y manufactura de estos insumos especializados.

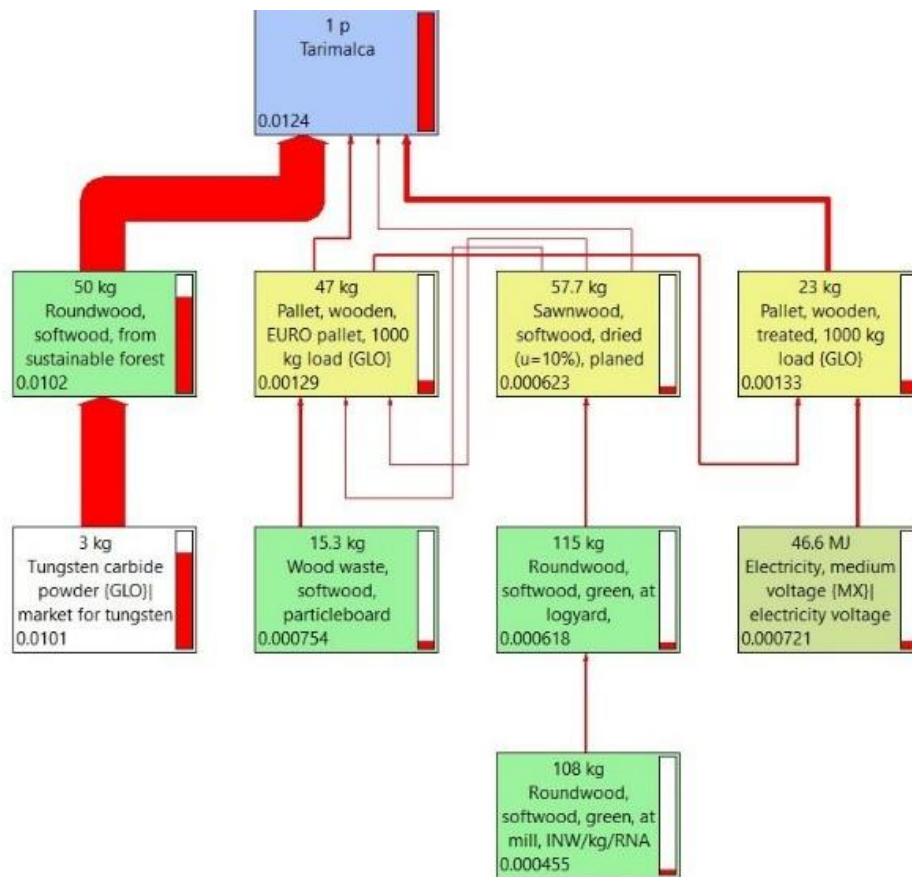


Figura 13. Diagrama de flujo de la producción de una tarima de madera (Fuente: Propia)

Como se mencionó previamente, la fase de extracción de madera en rollo es la que genera el mayor impacto ambiental dentro del ciclo de vida de la tarima, siendo el uso de sierras de tungsteno el principal factor contribuyente. No obstante, el consumo de combustibles fósiles como gasolina y diésel, así como el uso de lubricantes, representa una fracción menor del impacto total en esta etapa (**Figura 18**). Esto sugiere que, si bien la maquinaria forestal es indispensable para la operación, la mayor carga ambiental proviene de la fabricación y el transporte de los insumos especializados utilizados en el proceso de corte, particularmente aquellos que requieren procesos industriales de alta demanda energética y que son importados desde otros países.

En la etapa de aserrío, se observa un impacto significativo asociado a la generación de residuos, especialmente en forma de aserrín y costera. Se estima que, por cada tarima fabricada, se generan aproximadamente 25 kg de estos subproductos, lo que

representa cerca del 50% de la madera en rollo procesada (**Figura 19**). Este nivel de desperdicio no solo implica una pérdida de material aprovechable, sino que también conlleva un impacto ambiental debido a la disposición y posible aprovechamiento de estos residuos. En algunos aserraderos, estos subproductos pueden destinarse a la producción de tableros de partículas, pellets o incluso ser utilizados como biomasa para generación de energía térmica, lo que mitigaría parcialmente su impacto ambiental.

Por otro lado, en la fase de armado de la tarima, el impacto ambiental se distribuye de manera más uniforme. Aunque la generación de residuos sigue presente, no se observa una diferencia tan marcada entre los distintos insumos empleados en esta fase (**Figura 20**).

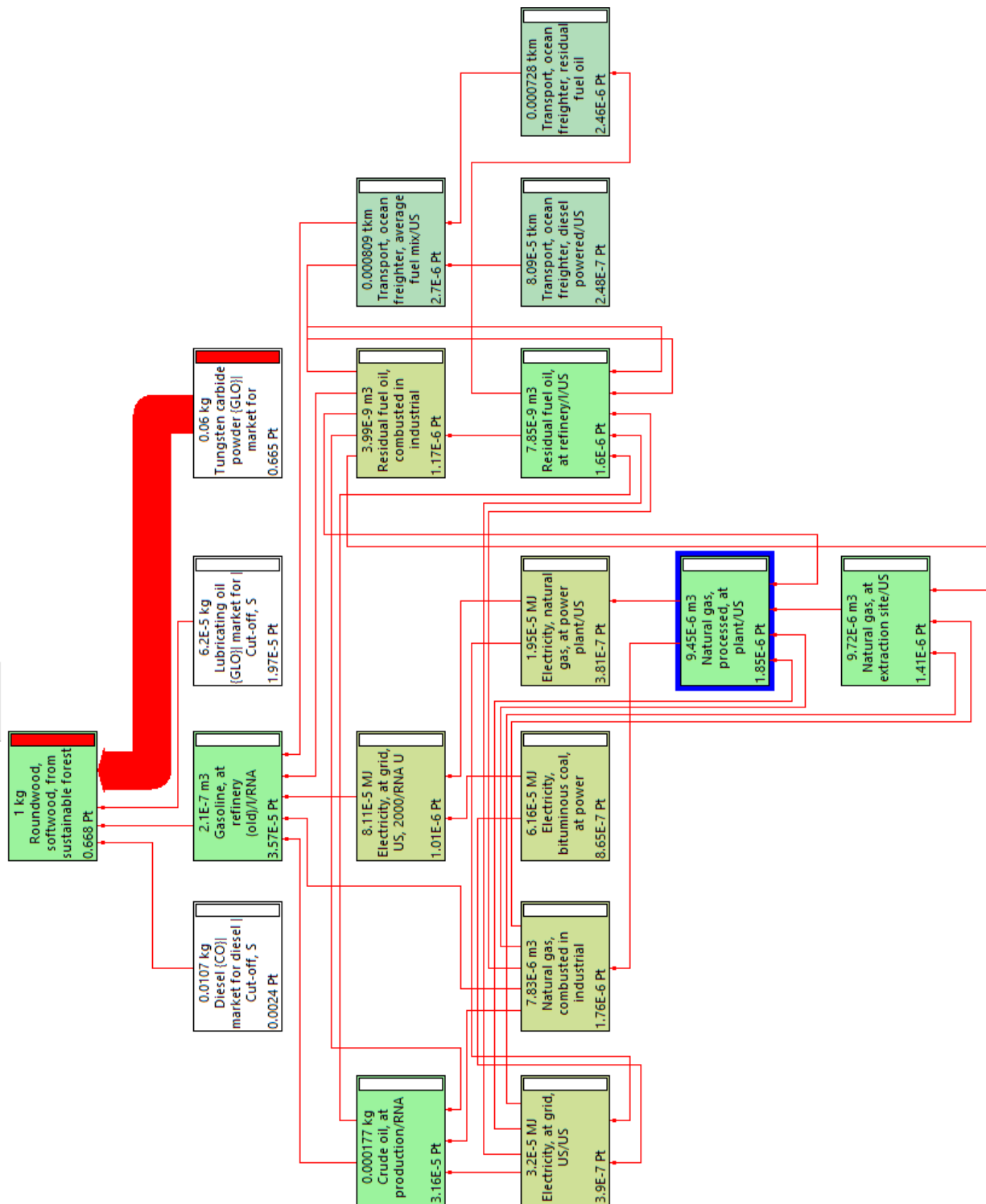


Figura 14. Diagrama de flujo de extracción de madera en rollo (Fuente: Propia)

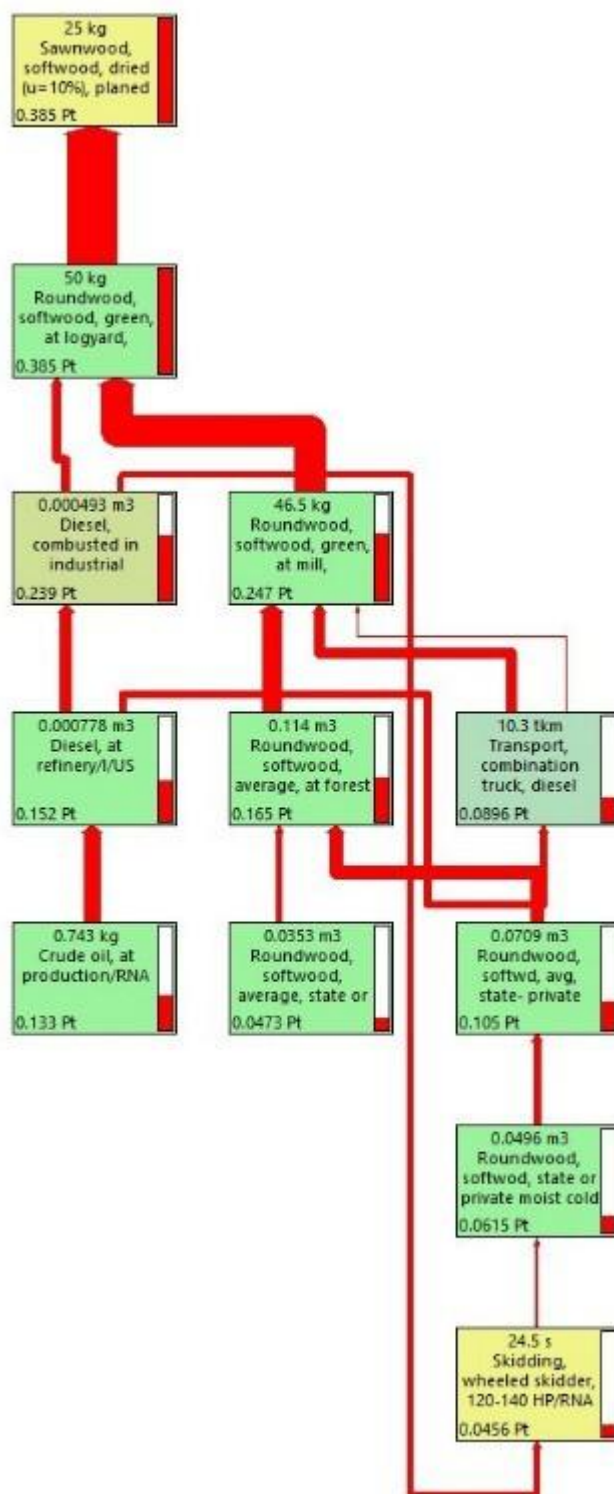


Figura 15. Diagrama de flujo de aserrío de madera (Fuente: Propia)

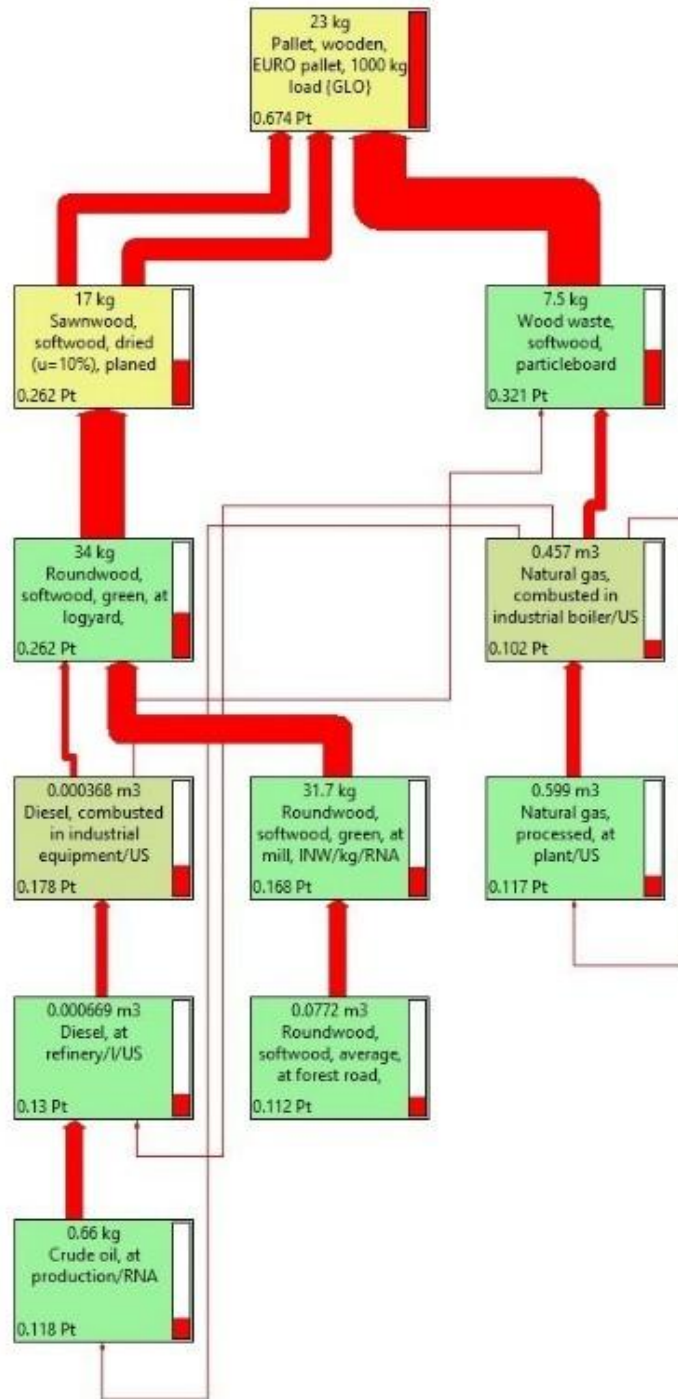


Figura 6. Diagrama de flujo de armado de una tarima de madera (Fuente: Propia)

5.2 Evaluación de ciclo de vida de tarimas de plástico

Este apartado presenta los resultados del ACV de las tarimas de plástico. La etapa evaluada en el estudio fue: fabricación (**Figura 21**). A diferencia de las tarimas de madera, las tarimas de plástico no requieren tratamiento fitosanitario para eliminar plagas.

Los datos utilizados en el análisis provienen de las bases de datos Eco Invent y U.S. Life Cycle Inventory. Los Tarimas de plástico pueden fabricarse con resinas de polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). En este estudio, se ha considerado el polietileno de alta densidad (HDPE) como material base.

Al igual que en el ACV de las tarimas de madera, la evaluación de impactos se llevó a cabo utilizando: Eco Indicator 99.

La producción de una tarima de plástico tiene un potencial de calentamiento global de 50 kg CO₂ eq. Una parte significativa de este impacto proviene de la producción de resina HDPE y del molde de plástico utilizado en el proceso de moldeo por inyección. La producción de 1 kg de molde de plástico genera un GWP de 2.04 kg CO₂ eq. La producción de 1 kg de resina HDPE tiene un GWP de 1.19 kg CO₂ eq (**Tabla 9**).

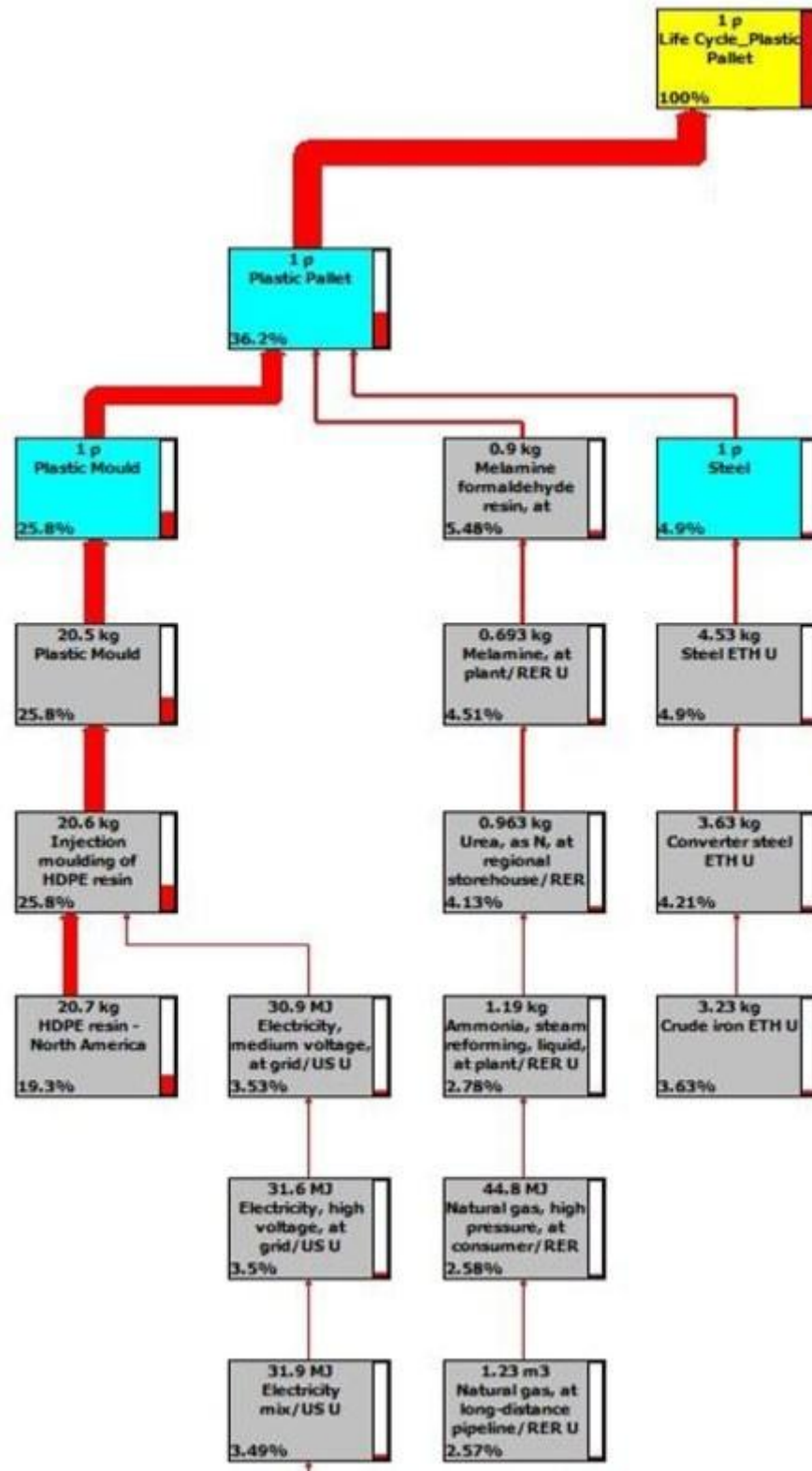


Figura 7. Diagrama de flujo de una tarima de plástico utilizando Eco indicador 99.

Tabla 9. Resultados de la evaluación de impacto usando Eco Indicador 99.

<i>Categoría de Impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Manufactura</i>
<i>Carcinógenos</i>	DALY	2.68E-06	2.15E-06
<i>Resp. Orgánicos</i>	DALY	3.02E-07	6.65E-08
<i>Resp. Inorgánicos</i>	DALY	0.00015	5.41E-05
<i>Cambio climático</i>	DALY	2.97E-05	1.36E-05
<i>Radiación</i>	DALY	1.13E-07	1.01E-07
<i>Capa de ozono</i>	DALY	3.79E-08	2.9E-09
<i>Ecotoxicidad</i>	PAF*m ² yr	14.004	12.002
<i>Acidificación/ Eutrofización</i>	PDF*m ² yr	5.12	1.395
<i>Uso del suelo</i>	PDF*m ² yr	0.287002	0.202627
<i>Minerales</i>	MJ surplus	0.617719	0.591047
<i>Combustibles fósiles</i>	MJ surplus	65.878	18.363

Las tarimas de plástico fabricados con plástico moldeado duran mucho más que las tarimas de madera. Esto se debe a que las tarimas de plástico, a diferencia de las de madera, no se rompen ni se dañan fácilmente, y los de mejor calidad pueden realizar más antes de ser retirados del servicio (Stratis Pallets, 2009).

5.3 Comparación de los resultados del ACV de tarimas de madera y plástico

El análisis de ciclo de vida de las tarimas de madera y plástico revela diferencias significativas en términos de impacto ambiental, durabilidad y eficiencia en su uso.

Las tarimas de plástico, fabricadas con polietileno de alta densidad (HDPE), tienen una vida útil mucho más prolongada que las de madera. A diferencia de estas últimas, no se rompen ni se dañan fácilmente. En contraste, las tarimas de **madera**, a pesar de su fabricación con recursos renovables, tienen una menor resistencia y requieren reemplazo con mayor frecuencia.

Desde el punto de vista ambiental, la producción de una tarima de plástico genera un potencial de calentamiento global de 50 kg de CO₂ equivalente, mientras que una tarima de madera emite 133.62 kg de CO₂ equivalente, más del doble de emisiones. Esto se debe principalmente al proceso de extracción y secado de la madera, que demanda un alto consumo de energía y combustibles fósiles.

En cuanto a otros impactos ambientales evaluados con el método Eco Indicador 99, se observa que las tarimas de madera tienen un impacto más alto en la ecotoxicidad terrestre y acuática, con valores de 444.69 kg de 1,4-DCB en suelo y 144.11 kg de 1,4-DCB en agua, debido al uso de tratamientos químicos y residuos generados en su producción. Por otro lado, las tarimas de plástico presentan una mayor demanda de combustibles fósiles (65.87 MJ surplus frente a 1.53 MJ surplus de las de madera), debido a la energía requerida para la fabricación del HDPE y el moldeo del plástico (**Tabla 10**).

En términos de uso del suelo, las tarimas de madera requieren 9.90 m²a crop eq, en comparación con 0.28 m²a crop eq de las tarimas de plástico, lo que refleja el impacto del aprovechamiento forestal. No obstante, al final de su vida útil, las tarimas de madera pueden ser reutilizadas o degradadas más fácilmente, mientras que las de plástico requieren procesos específicos de reciclaje para minimizar su impacto ambiental.

Tabla 10. Comparación de la evaluación de resultados de Eco Indicador 99.

<i>Categoría de Impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Tarima de Plástico</i>	<i>Tarima de Madera</i>
<i>Carcinógenos</i>	DALY	2.68E-06	7.54E-05
<i>Resp. orgánicos</i>	DALY	3.02E-07	2.32E-09
<i>Resp. inorgánicos</i>	DALY	0.00015	6.53E-06
<i>Cambio climático</i>	DALY	2.97E-05	3.84E-07
<i>Ecotoxicidad</i>	PAF*m ² yr	14.004	21.82
<i>Acidificación/Eutrofización</i>	PDF*m ² yr	5.12	0.31
<i>Uso del suelo</i>	PDF*m ² yr	0.287002	0.1089

<i>Combustibles fósiles</i>	MJ surplus	65.878	1.53
-----------------------------	---------------	--------	------

5.4 Interpretación de resultados

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) aplicado a las tarimas de madera revelan que la etapa de mayor impacto ambiental es la extracción de materia prima, especialmente debido al uso de sierras de tungsteno con características técnicas especializadas y origen importado, lo que incrementa considerablemente la carga ambiental. Estas sierras, al requerir procesos industriales de alta energía para su manufactura y ser transportadas desde el extranjero (Suiza), introducen impactos significativos en categorías como ecotoxicidad terrestre, cambio climático y escasez de recursos minerales. Si bien el consumo de combustibles fósiles y lubricantes durante esta etapa es relevante, su contribución al impacto total es comparativamente menor.

Por otro lado, el aserrío representa una segunda área crítica, debido a la elevada generación de residuos sólidos como aserrín y costera, que representan hasta el 50% del volumen original de la madera en rollo. Esta pérdida de material, si no es gestionada adecuadamente, contribuye al incremento de la huella ambiental del proceso. Sin embargo, este residuo podría ser valorizado mediante estrategias de economía circular, como la producción de tableros aglomerados, pellets o biocombustibles sólidos, lo que no sólo mitigaría su impacto, sino que contribuiría al aprovechamiento integral del recurso forestal.

La fase de armado, en contraste, muestra un impacto ambiental comparativamente menor y más homogéneamente distribuido entre los diferentes insumos (clavos, diésel, energía). Esta etapa, al no requerir procesos altamente intensivos en energía o materiales, ni generar grandes cantidades de residuos, presenta una oportunidad para optimizar sin grandes inversiones tecnológicas. Finalmente, el tratamiento térmico, aunque necesario por motivos fitosanitarios, implica un consumo

considerable de energía térmica y eléctrica, lo cual también contribuye al impacto general, especialmente en las categorías de consumo de combustibles fósiles y ecotoxicidad.

En el caso de las tarimas de plástico, la evaluación muestra que su impacto en el calentamiento global es significativamente menor (50 kg CO₂ eq por unidad) que en las de madera (133.62 kg CO₂ eq). No obstante, este beneficio debe ser analizado en función del uso del plástico virgen (resina HDPE), cuya producción conlleva impactos importantes en la categoría de ecotoxicidad (14.004 PAFm³yr) y consumo de combustibles fósiles (65.87 MJ surplus).

Las áreas de mejora se describen a continuación proceso por proceso:

-Extracción de madera en rollo

- Sustituir o complementar el uso de sierras de tungsteno.
- Implementar programas de logística inversa para reciclaje o reacondicionamiento de estas herramientas.

-Aserrió

- Implementar líneas paralelas de aprovechamiento de residuos (biomasa, tableros, compost).
- Introducir tecnologías de corte con mayor precisión para reducir la generación de sobrantes.

-Tratamiento térmico

- Incorporar fuentes de energía renovable en el proceso.
- Optimizar el diseño de cámaras térmicas para mejorar la eficiencia energética.

Estos hallazgos permiten identificar con claridad las etapas prioritarias para la intervención ambiental dentro del ciclo de vida de las tarimas de madera. Las estrategias sugeridas buscan no sólo mitigar impactos negativos, sino también fortalecer la competitividad del producto mediante prácticas más sostenibles y alineadas con principios de economía circular.

6. Conclusiones

El ACV desarrollado en este estudio permitió evaluar con detalle los impactos ambientales asociados a la producción, uso y disposición final de las tarimas de madera y plástico dentro de la industria logística. Los resultados obtenidos evidencian que, si bien ambos materiales presentan ventajas y desventajas específicas en términos ambientales, económicos y de durabilidad, es imperativo avanzar hacia estrategias que minimicen la carga ecológica de estos productos a lo largo de su ciclo de vida.

En términos de emisiones de gases de efecto invernadero, la fabricación de tarimas de madera genera un mayor impacto que las de plástico, alcanzando valores de 133.62 kg de CO₂ equivalente, en comparación con los 50 kg de CO₂ equivalente de las tarimas plásticas. Este hallazgo subraya la importancia de considerar el consumo energético y los procesos de transformación industrial como factores determinantes en la sostenibilidad de los productos de embalaje. En particular, el secado de la madera y los tratamientos de preservación representan una de las fases más intensivas en consumo energético, lo que sugiere la necesidad de innovaciones en eficiencia térmica y fuentes de energía renovable para reducir estos impactos.

Sin embargo, desde la perspectiva de la durabilidad y reutilización, las tarimas de plástico demuestran un desempeño superior, en comparación con las tarimas de madera, que requieren reemplazo con mayor frecuencia debido a su susceptibilidad a daños estructurales. Esta característica implica que, aunque la producción inicial de una tarima plástica involucra un mayor consumo de combustibles fósiles, su longevidad permite amortiguar su impacto a lo largo del tiempo, especialmente si se implementan estrategias eficientes de reciclaje y recuperación de materiales al final de su vida útil.

Otro aspecto relevante identificado en este estudio es el impacto de las tarimas de madera en términos de uso del suelo y ecotoxicidad. La extracción de madera

requiere una cifra significativamente mayor a los de las tarimas plásticas, lo que evidencia la presión sobre los ecosistemas forestales debido a la creciente demanda de este material en la industria logística. Asimismo, el uso de químicos para el tratamiento y protección de la madera genera una carga ambiental considerable, lo que resalta la necesidad de regulaciones más estrictas en cuanto a la gestión de residuos y emisiones derivadas de estos procesos.

Desde una perspectiva económica y social, el mercado de tarimas de madera en México ha experimentado un crecimiento significativo, lo que refleja su importancia en la cadena de suministro global. No obstante, este crecimiento también intensifica la presión sobre los recursos forestales, lo que plantea desafíos tanto en términos de regulación ambiental como en la implementación de certificaciones de manejo sustentable. En este sentido, la valorización de residuos maderables, como el aserrín y otros subproductos, se presenta como una estrategia clave para reducir desperdicios y fomentar modelos de negocio circulares dentro de la industria.

El presente estudio pone en evidencia que la sostenibilidad en el sector de embalaje y transporte no puede abordarse únicamente desde la perspectiva de reducción de emisiones, sino que requiere un enfoque integral basado en la economía circular. Esto implica la reestructuración de los procesos de producción, fomentando la incorporación de biomateriales avanzados y compuestos reciclados que reduzcan la dependencia de recursos fósiles y minimicen los impactos en los ecosistemas naturales. La optimización de procesos logísticos y el uso de energías renovables son medidas necesarias, pero insuficientes si no van acompañadas de políticas públicas que incentiven la innovación en materiales y promuevan el diseño de productos con menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida.

Finalmente, este análisis destaca la urgencia de avanzar hacia un modelo logístico resiliente y sostenible, donde la selección de materiales, la eficiencia en el uso de los recursos y la implementación de estrategias de reutilización y

reciclaje sean ejes fundamentales. La transición hacia un sistema verdaderamente sustentable dependerá de la capacidad de los actores del sector para adoptar tecnologías emergentes, minimizar externalidades y rediseñar los flujos de materiales en la economía global. En este contexto, es crucial continuar con investigaciones que integren nuevas alternativas de materiales biodegradables o híbridos con menor impacto ambiental, así como desarrollar herramientas de ACV más precisas que permitan evaluar con mayor profundidad los efectos a largo plazo de estos productos en el medio ambiente.

Referencias

- Anil Philip, S. K. (2010). *ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF PALLETS USING LIFE CYCLE ANALYSIS AND MULTI-OBJECTIVE DYNAMIC PROGRAMMING* [Master Thesis]. Pennsylvania State University.
- Anil, S. K., Ma, J., Kremer, G. E., Ray, C. D., & Shahidi, S. M. (2020). Life Cycle Assessment Comparison of wooden and plastic Pallet in the grocery industry. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4), 871-886. <https://doi.org/10.1111/jiec.12974>
- Bare J. C., G. A. Norris, D. W. Pennington and T. McKone. (2003). TRACI, The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4).
- Bilbao, A. (2011). Environmental impact analysis of alternative pallet management system [Tesis de Maestría]. ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Clarke J. 2002. Cost, performance tradeoffs of racks, Pallet. *Pallets Enterprise: Pallets and Packaging* 101. Disponible en: <http://www.tarimaenterprise.com/articledatabase/articles/page87.pdf>
- Comercializadora de Madera y Armado de Tarimas “Los Pinos” (CMAT). 2024. Comunicación personal con J. T., Dueño de CMAT “Los Pinos”, Santa Clara del Cobre, Michoacán.
- CONAFOR (2021). Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2018. Disponible en: www.semarnat.gob.mx.
- Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>
- Daniel S. E., G. T. Tsoulfas, C. P. Pappis and N. P. Rachaniotis. 2004. Aggregating and evaluating the results of different environmental impact assessment methods. *Ecological Indicators*, 4, 125–138.
- Federation, B. P. (2025). *Life Cycle Analysis (LCA) - A Complete Guide to LCAs*. British Plastics Federation. https://www.bpf.co.uk/sustainable_manufacturing/life-cycle-analysis-lca.aspx

- García-Durañona, L., Farreny, R., Navarro, P., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Life cycle assessment of a coniferous wood supply chain for pallets production in Catalonia, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 137, 178-188.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.032>
- Glenn, J. and Gordon, T. (1998) *State of the Future: Issues and Opportunities – Foresight International*.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). *The Eco-indicator 99: A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment - Methodology report*. PRé Consultants. Disponible en: https://pre-sustainability.com/wp-content/uploads/2013/10/EI99_methodology_v3.pdf
- Guinee J. B., H. A. Udo de Haes and G. Huppes. 1993. Quantitative life cycle assessment of products 1: Goal definition and inventory. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), 3-13.
- Guinee J. B., R. Heijung, H. A. Udo de Haes and G. Huppes. 1993. Quantitative life cycle assessment of products 2: Classification, valuation and improvement analysis. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), 81-91.
- Heinimann, HR. (2012). *Life cycle assessment (LCA) in forestry - state and perspectives*. *Croat. J. For. Eng.* 33(2): 357-372.
- HuaDing. (2023). *Decodificando el proceso: cómo se fabrican las Tarimas de plástico*. [Online] Disponible en: <https://www.tarimaboxchina.com/info/how-plastic-Tarimas-are-made-9031722.html>
- INEGI (2023). *Banco de indicadores (inegi.org.mx)*
- ISO. (2006). ISO 14040:2006(es). *Gestión ambiental- Análisis del ciclo de vida -Principios y marco de referencia*. Sitio web: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Jensen A. A., L. Hoffman, B. T. Moller and A. Schmidt. (1997). *Life cycle assessment a guide to approaches, experiences and information sources*. Environmental Issue Series, 6, 1-119 Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C/Issue-report-No-6.pdf>

- Klein, D; Wolf, C; Schulz, C; Weber-Blaschke, G. (2015). *20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. Int J of Life Cycle Assess.* 20. 556-575.
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice.* John Wiley & Sons.
- Kurisunkal, S. (2010). *Environmental analysis of Pallets using life cycle analysis and multi-objective dynamic programming* [Maestría en Ciencias]. The Pennsylvania State University.
- Marano J. J. and S. Rogers. (2004). Process system optimization for life cycle improvement. *Environmental Progress*, 18(4) 267-272.
- Mazeika Bilbao, Ainoa, "Environmental impact analysis of alternative pallet management systems" (2011). Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from <https://repository.rit.edu/theses/5703>
- Milota, M. R., West, C. D., & Hartley, I. D. (2005). Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. *Wood and Fiber Science*, 37(CORRIM Special Issue), 47–57.
- Niero, M., Di Felice, F., Ren, J., Manzardo, A., & Scipioni, A. (2014). How can a life cycle inventory parametric model streamline life cycle assessment in the wooden pallet sector? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 901-918. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0705-6>
- NWPCA, 2014. Pallet dimensions and standards. [Online] Disponible en: [https://cdn.ymaws.com/www.palletcentral.com/resource/collection/E8AADDDE-7CBA-4298-8341-C7F29D0C14FF/Uniform-Standard-for-Wood-Pallets-2014\(REV\).pdf](https://cdn.ymaws.com/www.palletcentral.com/resource/collection/E8AADDDE-7CBA-4298-8341-C7F29D0C14FF/Uniform-Standard-for-Wood-Pallets-2014(REV).pdf)
- ONU (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3)*, Santiago.
- PRé Sustainability. (2024). *SimaPro Software for Life Cycle Assessment*. Disponible en: <https://www.pre-sustainability.com>
- Rebitzer G., T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W. P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema and D. W. Pennington. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International*, 30, 701-720.

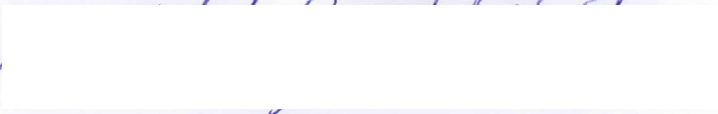
- Rodríguez, M. (2015). Guía de Seguridad en procesos de Almacenamiento y Manejo de Cargas. Disponible en: <https://www.udc.es/archivos/sites/udc/prl/procedimientos/Guiaxseg.xalmacenam.xyxmanejoxcargas.pdf>
- Salmerón, J. S., González, W. F., Meza-Picado, V., & Guier, F. A. (2021). Impacto sobre el cambio climático del ciclo de vida de las tarimas de madera elaboradas en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Ciencias Ambientales*, 55(1), 32-51. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.2>
- Santos, H. C. M., Maranduba, H. L., De Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2016). Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3470-3482. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8084-0>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2017. NORMA Oficial Mexicana NOM-144-SEMARNAT-2017, Que establece las medidas fitosanitarias y los requisitos de la marca reconocidas internacionalmente para el embalaje de madera que se utiliza en el comercio internacional de bienes y mercancías.
- SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (1997). *New Working groups. LCA News* 7(6).
- SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (1998). *SETAC LCA Working group: Scenario development in LCA. SETAC Europe News* 9(6):14.
- TMF Corporation. 2007. *The Plastic Pallet and Fire Protection*. [Online] Disponible en: <https://www.tmfcorporation.com/resources/>
- Wack, P. (1985). *Scenarios: Uncharted waters ahead*. Harvard Business Review.
- Windle P. N., The OTA report on harmful nonindigenous species. Disponible en: <http://www.invasive.org/symposium/windle.html>

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	si	Búsqueda de citas de artículos científicos específicos.
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 22/09/25

Luis Modesto Reséndiz Sánchez

Análisis de Ciclo de Vida de la producción de tarimas.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:503400791

Fecha de entrega

25 sep 2025, 8:18 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

25 sep 2025, 8:21 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Análisis de Ciclo de Vida de la producción de tarimas.pdf

Tamaño del archivo

2.9 MB

74 páginas

15.519 palabras

86.781 caracteres