



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA
PRODUCCIÓN DE TARIMAS (PALLETS
AMERICANOS) EN EL MUNICIPIO DE JACONA
DE PLANCARTE, MICHOACÁN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

JOSÉ PABLO DEL RÍO GÓMEZ

DIRECTOR(A) DE TESIS: DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE
CODIRECTOR(A) DE TESIS: RICARDO MUSULE LAGUNES

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 21



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **30 de agosto del 2021**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **José Pablo Del Río Gómez** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **417016720**, con el trabajo titulado: **"Análisis del Ciclo de Vida de la producción de tarimas (pallets americanos) en el municipio de Jacona de Plancarte, Michoacán"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Carlos Alberto García Bustamante y como **co-tutor** el Dr. Ricardo Musule Lagunes.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. José Núñez González
Vocal: M.C. Patricia Aguilar Sánchez
Secretario: Dr. Carlos Alberto García Bustamante
Suplente: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones
Suplente: Dra. Maribel Arenas Navarro

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 09 de noviembre de 2021.


DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN
SECRETARIA GENERAL

Agradecimientos institucionales

A la UNAM, a la ENES Morelia y a la Licenciatura en Ciencias Ambientales, por ofrecerme siempre las mejores instalaciones, con los mejores profesores, quienes año con año, inculcaron en mí, un gran deseo por la investigación.

Al laboratorio de Ecotecnologías de la ENES Morelia, por aceptarme como uno más de sus miembros y ofrecerme las herramientas y los conocimientos necesarios para culminar con el mayor éxito posible este trabajo.

Al Dr. Carlos García, por haber sido parte de mi formación universitaria, desde los primeros semestres de la carrera, hasta ahora con mi proyecto de tesis, sin dejar, por un lado, su gran carisma y apoyo, que sin duda aprendo de eso para ser una mejor persona en lo personal y profesional.

Al Dr. Ricardo Musule, por haber insistido en que entrara al laboratorio de Ecotecnologías; de no haber sido por eso, nada de esto sería posible. Además de todo el apoyo y confianza que me has otorgado a lo largo de mi proceso de titulación, que, sin duda, no fue fácil, lo hicieron más llevadero y agradable.

Al Lic. John Solano, por dedicar esfuerzo y tiempo en apoyarme con el proyecto de tesis, aportando su conocimiento y experiencia en sistemas de producción de tarimas, que, sin duda, influyó y facilitó en tener una mejor estructura y entendimiento del trabajo de tesis, aportando valiosas contribuciones para este trabajo.

Al Lic. Joel Bonales, por apoyarme con información y su valiosa experiencia con el manejo de software Simapro 8.5 especializado, así como su contribución para este trabajo.

A cada uno de mis sinodales: el Dr. José Nuñez, la MC. Patricia Aguilar, el Dr. Carlos Alberto García, el Dr. José Guadalupe y la Dra. Maribel Arenas, por haber aceptado ser parte de mi jurado y, por todo el empeño y la dedicación que tuvieron durante mi último proceso de tesis, sus comentarios y recomendaciones enriquecieron el trabajo, les agradezco mucho.

Agradecimientos personales

Al Dr. Ricardo Musule, qué a lo largo de este proceso, más que un tutor, se volvió un amigo, con el que espero seguir contando para futuros trabajos y actividades.

A mi dream team (Ulises, Tziraat, Marlon, Brayan, Alan, Juan y Ángel), desde que entré en la carrera, incluso antes de esta, nunca me había relacionado tanto con amigos como lo he hecho con ustedes, por su apoyo, sus bromas, su carisma y sin duda alguna por su amistad (#FEFA), muchas gracias.

A mis amigos y compañeros de la licenciatura, por cada momento que eh convivido con ustedes, y que ha dejado marca en mí. Es evidente qué de nombrar a todos, los agradecimientos abarcarían más páginas que la tesis, estén seguros que los recordaré por siempre, les estoy agradecido por todo.

A mis roomies (Frida y Héctor de la Rosa), por haberme aguantado todo el tiempo que compartimos casa, por las noches de películas, por los buenos momentos y su valiosa compañía.

A Eileen Daniela Montes de Oca Bolaños, por haber estado conmigo gran parte de la carrera, apoyándome a cumplir mis metas y por todo lo que pasamos juntos, pues eso, ayudó a que sea la persona que soy ahora.

A mis padres: Ana Rosa Gómez Rodríguez y Gonzalo Del Río Rosales, por todo: el cariño, apoyo, confianza y educación que siempre me brindan, por preocuparse de que siga desarrollándome en el ámbito personal y profesional, por ser un valioso ejemplo de vida para mí.

A mi hermano, Rodrigo Del Río Gómez, por ser mi socio, mi confidente, mi amigo, por apoyar y retribuir con cada cosa que me propongo hacer.

Resumen

Mundialmente, uno de los productos maderables que más ha destacado dentro de esta industria, es la fabricación de tarimas de madera. Aunque de manera general su proceso de producción es bien conocido, la evaluación de sus impactos ambientales ha sido poco abordada, principalmente a escalas regionales/locales dentro del contexto mexicano. Es por ello que, el objetivo del presente estudio fue analizar mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) los impactos ambientales potenciales del proceso de producción de tarimas (pallet americano) y sus diferentes etapas de proceso (de la cuna a la puerta del consumidor) de un aserradero ubicado en el municipio de Jacona del Plancarte, Michoacán, México. Para ello fue desarrollado un modelo de ACV considerando un pallet americano como unidad funcional. Los datos de inventario empleados en el ACV fueron mayoritariamente recopilados por visitas hechas al aserradero (datos primarios). Se seleccionó la asignación másica como el método más adecuado para distribuir los impactos ambientales a los co-productos y productos del sistema bajo estudio y se analizaron once diferentes categorías de impacto: agotamiento abiótico, agotamiento abiótico (combustibles fósiles), calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática de agua dulce, ecotoxicidad acuática marina, ecotoxicidad terrestre, formación de fotooxidantes, acidificación y eutrofización. Sin embargo, se priorizó en algunos impactos más relevantes para este sistema tales como: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y formación de fotooxidantes. La etapa de evaluación de impacto fue realizada mediante la metodología de evaluación de impacto CML 2001, utilizando para la modelación el software SimaPro 8.5. Con base en nuestros resultados se encontró una huella de carbono de 4.61 kg CO_{2eq} / tarima, dato muy similar a lo reportado en el estudio de Ruisheng *et al.* (2014) hecho en Singapur, con una diferencia de 0.601 kg CO_{2eq} / tarima y también cercano a lo obtenido por John Solano (2017), con una diferencia de 1.54 kg CO_{2eq} / tarima en un contexto costarricense. Los puntos críticos o hotspot para este sistema se encontraron dentro de las etapas del proceso transporte de la madera en rollo, asociado principalmente al insumo de diésel. Se encontró que estas etapas del proceso son claves en el desempeño ambiental del sistema de producción de tarimas de madera, ya que influyeron mayoritariamente en gran parte de las categorías de impacto ambiental aquí estudiadas, por lo que algunas medidas como: reducir la distancia del transporte, comprando la madera en rollo en sitios más cercanos de dónde es procesada (por mencionar un ejemplo), podrían ayudar a reducir la huella ambiental de este sistema de producción.

Summary

Worldwide, one of the timber products that has stood out the most in this industry is the manufacture of wooden pallets. Although its production process is generally well known, the evaluation of its environmental impacts has been little addressed, mainly at regional / local scales within the Mexican context. That is why the objective of this study was to analyze through a Life Cycle Analysis (LCA) approach the potential environmental impacts of the pallet production process (American pallet) and its different process stages (from cradle to cradle. consumer door) of a sawmill located in the municipality of Jacona del Plancarte, Michoacán, Mexico. For this, an LCA model was developed considering an American pallet as a functional unit. The inventory data used in the LCA were mostly collected by visits made to the sawmill (primary data). Mass allocation was selected as the most appropriate method to distribute the environmental impacts to the co-products and products of the system under study and eleven different impact categories were analyzed: abiotic depletion, abiotic depletion (fossil fuels), global warming, depletion of the ozone layer, human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, formation of photo-oxidants, acidification and eutrophication. However, priority was given to some more relevant impacts for this system such as: global warming, depletion of the ozone layer and formation of photo-oxidants. The impact evaluation stage was carried out using the CML 2001 impact evaluation methodology, using the SimaPro 8.5 software for modeling. Based on our results, a carbon footprint of 4.61 kg CO₂eq / pallet was found, data very similar to that reported in the study by Ruisheng et al. (2014) made in Singapore, with a difference of 0.601 kg CO₂eq / pallet and also close to that obtained by John Solano (2017), with a difference of 1.54 kg CO₂eq / pallet in a Costa Rican context. The critical points or hotspots for this system were found within the stages of the roundwood transportation process, mainly associated with the diesel input. It was found that these stages of the process are key in the environmental performance of the wooden pallets production system, since they mainly influenced a large part of the environmental impact categories studied here, for which some measures such as: reducing the transport distance By purchasing roundwood from sites closer to where it is processed (to mention an example), they could help reduce the environmental footprint of this production system.

Contenido

1	Marco Referencial	1
1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	3
1.3	Pregunta de investigación	7
1.4	Objetivos	7
1.4.1	General	7
1.4.2	Particulares.....	7
2	Marco teórico.....	9
2.1	Metodología del análisis de ciclo de vida.....	9
2.1.1	Metodología CML.....	16
2.2	Pallet de madera	21
2.3	Tipos	21
2.4	Clasificación.....	22
2.4.1	Estructura	22
2.4.2	Tamaño.....	23
2.4.3	Aspectos Fitosanitarios (NIMF-15).....	23
3	Marco metodológico	26
3.1	Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	26
3.1.1	Definición de objetivo y alcances.....	26
3.1.2	Análisis de inventario	28
3.1.3	Evaluación de impacto.	31
4	Resultados y Discusión	34
4.1	Descripción del proceso de fabricación de tarimas de madera VG	34
4.2	Inventario de datos primarios.....	38
4.3	Evaluación del sistema	43
4.4	Resultados de la evaluación de impacto	46
4.4.1	Calentamiento global (CG).	48
4.4.2	Agotamiento del ozono estratosférico (AOE).	49
4.4.3	Oxidación fotoquímica (OF).	50
4.4.4	Acidificación (A), Ecotoxicidad terrestre (ET), Eutrofización (E) y Agotamiento abiótico (AA).....	51

4.4.5	Toxicidad humana (TH)	52
4.4.6	Agotamiento abiótico (AA).....	53
4.4.7	Ecotoxicidad acuática de agua dulce (ETAD) y Ecotoxicidad acuática marina (EAM). 53	
4.5	Interpretación	54
4.5.1	Limitantes en la obtención de datos	54
4.5.2	Identificación de hotspot y recomendaciones.....	55
4.5.3	Conclusión	56

Índice de Figura

Figura 1. Metodología del análisis de ciclo de vida (Fuente: ISO, 2006).....	10
Figura 2. Etapas del ciclo de vida incluidas en los límites de sistema más usuales en ACV. (Fuente: Ruiz & López, 2012).....	11
Figura 3. Diagrama de impactos de efectos intermedios, impactos de efectos finales y área de protección. Tomado de Gobierno Vasco (2017).	14
Figura 4. Metodologías publicadas de Impactos ambientales de ciclos de vida desde el año 2000. (Fuente: Rosenbaum, 2017).....	15
Figura 5. Tarimas de larguero y tarima de bloque. (Imágenes obtenidas de Bilbao et al. 2011).	22
Figura 6. Elementos de unión impulsados para tarimas (Tomada de Parra, 2019).	25
Figura 7. Pallet americano (tarima VG).	27
Figura 8. Partes que conforman una tarima VG (pallet americano). A) Barrote, B) Duela, C) Clavo rolado.	27
Figura 9. Límites del sistema de la producción de tarimas VG en Zamora, Michoacán. “T1” y “T2” son transportes y “D” significa distribución.....	28
Figura 10. Fotografía aérea, donde se indican las dos instalaciones de la empresa.	29
Figura 11. Aparatos usados en la segunda visita: A) báscula Smart weigh PRO POCKET SCALE TOP2KG, B) báscula “escala de gancho multifuncional” y C) PROSTER, modelo: PST049.	30
Figura 12. Duelas VG.	30
Figura 13. Duelas 5/8.	30
Figura 14. Barrote sin ranuras.....	31
Figura 15. Barrote con ranuras.....	31
Figura 16. Clavo rolado utilizado para armar los elementos de madera que conforma la tarima. ..	31
Figura 17. Ruta del transporte de madera en rollo, inicia en Concepción de los aires, Jalisco y termina en Jacona del Plancarte, Michoacán.	34
Figura 18. Camión Freightliner 2000, descargando madera en rollo a la empresa. Tomada por el autor.....	35
Transporte 1.....	35
Figura 19. Imagen de un cuartón. Tomada por el autor.	35
Figura 20. Proceso de hojeado. Tomada por el autor.....	36
Figura 21. Imagen de una duela VG. Tomada por el autor.	36
Figura 22. Imagen de una duela 5/8. Tomada por el autor.	36
Figura 23. Imagen de un barrote. Tomada por el autor.....	37
Transporte 2.....	37
Figura 24. Imagen de la camioneta Toyota. Tomada por el autor.....	37

Figura 25. Imagen de una pistola de aire, herramienta con la que unen los distintos elementos que conforman la tarima. Tomada por el autor.....	37
Figura 26. Imagen del horno de gas LP en Tarimas Vicar. Tomada por el autor.....	38
Figura 27. Imagen de la camioneta Ford. Tomada por el autor.....	38
Figura 28. Diagrama de proceso de la empresa. Las letras “F” significan flujo de materia, enumeradas por orden de proceso, comenzando con el 1 hasta el 19. Las letras “I” significan insumos, enumerados también por orden de proceso.....	42
Figura 29. Impactos estimados por etapa de ciclo de vida. Etapas: Distribución Tarima (DT), Tratamiento Térmico (TT), Armado (A), Transporte Duela y Barrote luna (TDB), Recortado (RE), Hojeado (H), Cuarteado (CA), Transporte Madera en Rollo (TMR) y Extracción Madera en Rollo (ETR). (Elaboración propia).	47
Figura 30. Impacto del potencial de calentamiento global por tarima VG producida..... (Elaboración propia).....	49
Figura 31. Impacto del potencial de agotamiento de ozono por tarima VG producida. (Elaboración propia).....	50
Figura 32. Impacto del potencial de oxidación fotoquímica (OF) por tarima VG producida. (Elaboración propia).....	51
Figura 33. Impacto del potencial de: Acidificación (A) letra A, Ecotoxicidad terrestre (ET) letra B, Eutrofización (E) letra C y Agotamiento abiótico (fósil) (AAF) letra D, por tarima VG producida. ...	52
Figura 34. Impacto del potencial de toxicidad humana (TH) por tarima VG producida. (Elaboración propia).....	53
Figura 35. Impacto del potencial de agotamiento abiótico (AA) por tarima VG producida. (Elaboración propia).....	53
Figura 36. Impacto del potencial de: Ecotoxicidad de agua acuática dulce (ETAD) letra A y Ecotoxicidad acuática marina (EAM) letra B, por tarima VG producida. (Elaboración propia).	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Diversos trabajos de ACV sobre tarimas de madera, donde se analizan distintas categorías de impacto.	4
Tabla 2. CT mínima durante 24 horas para el embalaje de madera fumigado con bromuro de metilo. Elaboración propia con datos de FAO (2013).	24
Tabla 3. Análisis de inventario: Procesos y consumos por una semana de producción. Flujos escritos con rojo corresponden a flujos de referencia.* Debido a que éste sistema es multiproducto, se requirió de asignaciones másica, ** Para cada uno de los flujos del inventario se fue calculando su respectiva huella de carbono.	43

1 Marco Referencial

1.1 Introducción

En los países integrantes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), las industrias micro, pequeñas y medianas, representan el 99% del total y generan 60% de los empleos en esos países (OCDE, 2019), lo que además trae consigo, impactos ambientales, por ejemplo, emisiones al aire como gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), así como, compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas suspendidas totales (PST); en agua, incluye aguas residuales de proceso, metales pesados, carga orgánica y partículas sólidas suspendidas PSS (Peña *et al.*, 2011; Solano, 2017). Por esta razón, las empresas deben seguir lineamientos ambientales; tales como las normativas oficiales, o incluso, aquellas como la Agenda 21 emitida por la ONU en 1992, que tiene como objetivo fomentar sistemas limpios de producción¹ (de Dios *et al.*, 2011).

En el caso particular de las empresas asociadas al aprovechamiento de la madera, hay un centrado interés en la evaluación de sus impactos ambientales, ya que la madera y sus respectivos productos tienen el potencial de ser reutilizados, lo cual, puede proporcionar recuperación de materiales, así como de energía (Niero *et al.*, 2014). Mundialmente, las industrias madereras aportan el 2% del PIB y han sido capaces de abastecer la demanda creciente con productos de calidad (FAO, 2013).

Uno de sus productos más destacados de las industrias madereras, son las tarimas de madera (también conocidas como pallets de madera), las cuales, facilitan el transporte y almacenaje de mercancías para exportación. Las más comunes son los europallets o pallet europeo (800 x 1200 mm) y los isopallets o pallet americano (1219 x1016 mm), cuyas medidas están normalizadas internacionalmente por la asociación europea del pallet (TIMCON, 2017; MECALUX LOGISMARKET, 2018).

A nivel mundial, los pallets representan el 80% de los empaques utilizados para: exportación, montaje, apilamiento, almacenamiento, manejo y transporte de bienes (Carrano *et al.*, 2004; Molina, 2005; Kočí, 2019). La confederación de embalajes y pallets de madera (TIMCON por sus siglas en inglés) registró en el año 2003 que alrededor del mundo, 60 millones de metros cúbicos de madera por año son

¹ Es definida por la ONU, como una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente (ONUDI, s.f.).

consumidas para una producción equivalente a alrededor de 1.5 billones de tarimas. De manera particular en Europa se producen alrededor de 350 millones de tarimas. En los últimos 10 años, la producción de tarimas ha aumentado a 5.1 billones. Estados Unidos tiene en circulación dos billones de tarimas, de las cuales el 90% fueron producidas a base de madera maciza (Kóci, 2019; Carrano *et al.*, 2015). La producción de tarimas representa un importante flujo económico para las empresas, en el año 2015, se registraron en Europa 380,000 compañías productoras de madera, de las cuales el 20% de todo el consumo de la madera aserrada fue utilizada para fabricación de pallets y embalajes (García *et al.*, 2016).

De acuerdo a datos de INEGI, la última información registrada sobre producción de pallets (tarimas) en México fue en 2010, con un total de 10,207 tarimas sólo para el mes de noviembre de ese año (INEGI, 2021). Un dato más actual, obtenido del Sistema de Información Regional de México (SIREM, 2015), muestra que uno de los productos con mayor importancia durante los últimos diez años es la escuadría (que representa el 69.82% de la producción total del año 2014). La escuadría, son ciertas medidas de base que tienen en cuenta las tres dimensiones de una pieza aserrada: largo, ancho y grueso, de acuerdo a sus dimensiones reciben el nombre de: vigas, tablonés, tablas, tarimas entre otras.

En el contexto nacional, se ha estimado que entre el 75 y 85% de la producción e importación de productos maderables proviene del aprovechamiento de la madera de especies de coníferas y de esta el 77% proviene de los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán y México (López *et al.*, 2006). Dentro del grupo de las coníferas, los principales son: el pino (70.5%), el encino (14.5%), las especies comunes tropicales (9.1%), y el oyamel (2.6%) (SEMARNAT, 2021). La madera de pino es, por mucho, el producto más importante en volumen y valor (Chapela, 2012). Flores *et al.* (2007) cita un informe de SEMARNAT publicado en el año 2003, en el cual mencionaron que para ese año estaban registradas 3,497 industrias forestales, de las cuales el 88.6% correspondían a industrias del aserrío y cajas de empaque de madera, las restantes se distribuyen en: fábricas de muebles de chapata² y triplay, de tableros, impregnadoras, de celulosas y otros establecimientos que no reportan giro industrial.

Dentro de los productos de las empresas mexicanas de empaque de madera, también se producen las tarimas y los cajones, aprovechando el 12% de la madera aserrada (Chapela, 2012). De acuerdo con datos obtenidos de SEMARNAT (2017), en ese año estaban registradas 544 empresas certificadas, de las cuales, se desconoce con exactitud cuántas de estas empresas se dedica a la producción de tarimas, sin embargo, de Dios y Peña (2011) señalan que las principales compañías dedicadas a las tarimas son micro, pequeñas o medianas empresas (PYME), y se

² Chapata significa recubrir una superficie de madera con láminas muy delgadas. Esta operación de carpintería, llamada chapado, se puede aplicar en varios tipos de tableros: aglomerado, contrachapado, MDF, por mencionar los más comunes (mdec, 2021).

caracterizan por mantener unidades de producción de pequeña escala con bajos niveles de producción, bajos rendimientos y escasa eficiencia de conversión de sus materias primas (Fuentes *et al.*, 2006). La evidencia estadística indica que en promedio la contribución de emisiones de las empresas pequeñas no es tan notable como la de los establecimientos mayores (medianas y grandes), aunque no es despreciable (García & Fernández, 1998). En su conjunto emiten grandes cantidades de emisiones a la atmósfera, asociado con el uso inadecuado de los recursos, con una escasa eficiencia en los factores de producción y con pérdidas energéticas (Alfranca, 2009).

Por otra parte, una herramienta que ha ganado gran relevancia para la evaluación de los posibles impactos ambientales (Niero *et al.*, 2014) es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Análisis que puede incluir todo el ciclo de producción de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, hasta su disposición final (ISO, 2006), e intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto (Rodríguez, 2003).

Hasta el momento se han reportado pocos ACV a nivel global relacionados a la producción de tarimas, aunado a que dadas las particulares condiciones climáticas, tecnológicas, biológicas (tipo de madera aserrada) de las empresas productoras de tarimas, estas presentan diferencias en sus sistemas de producción, por este motivo no es posible generalizar y comparar los resultados obtenidos de los ACV. De esta forma existe una necesidad de estudios a un nivel local-regional (García *et al.*, 2016; Kočí, 2019).

1.2 Antecedentes

Existen distintos trabajos que han empleado el método del ACV para cuantificar impactos ambientales potenciales de tarimas, como los de Anil *et al.* (2010) y Wu *et al.* (2018), que comparan las huellas de carbono en tarimas de madera y plástico, cuantificando la cantidad de viajes (transportar productos de un lugar a otro), que llegan a tener las tarimas de madera y de plástico antes de ser desechadas.

En algunos trabajos de ACV, las tarimas de madera son incluidas en la etapa de empaquetado, ya que son uno de los principales medios en donde se transportan distintos productos (de la empresa, al lugar de consumo) (Bilbao *et al.*, 2010), como se presentan en el trabajo de Brickman *et al.* (1998) en donde las tarimas son utilizadas en el transporte de teléfonos, recorriendo 3380 km (90% por carretera, 10% por aire), sin embargo, también existen trabajos como el de Hekkert (2001) en donde únicamente trabajan con la etapa de empaquetados (embalajes y tarimas). En ambos trabajos, coinciden en que las tarimas de madera reducen las emisiones

de GEI en comparación con tarimas de otros materiales, por la capacidad de cada elemento que compone a la tarima de ser sustituido, y volverla a usar. Sin embargo, también mencionan, que se requiere mejorar la forma de producirla (uso de energía, materia prima) y la disposición final de las tarimas, ya que el 70-80% de estas son desechadas a vertederos sin ningún tipo de re-uso, acciones que puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con la finalidad de evaluar y disminuir los impactos ambientales de las tarimas de madera, se han hecho diversos ACV (de cuna a tumba), donde se busca mejorar el diseño (Niero, 2014), el tratamiento térmico (Shahidi, 2011), además de buscar la implementación de técnicas como el re-uso, re-manufacturación, manejo de materiales, incineración y tiradero de las tarimas, para tener un manejo sustentable en cada una de las etapas de producción (Bilbao et. al., 2011; Ng et al., 2014; Grazia et al., 2018).

Otros trabajos han abordado impactos ambientales distintos al cambio climático, por ejemplo, Alanya et al. (2018), analiza de cuna a tumba, los impactos de tarimas de madera, teniendo como unidad funcional 1000 viajes de productos donde se utilicen las tarimas, en este estudio se evalúa, además del cambio climático: eutrofización, acidificación, agotamiento del ozono, clorofluorocarbonos, formación de humo, salud humana y ecotoxicidad. Santo et al. (2017) hace una comparación de tarimas de maderas (desechadas y usadas como fuente de energía) con combustibles fósiles (gas natural y gasolina), evalúa ocho impactos ambientales: cambio climático, agotamiento del ozono, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, formación fotoquímica-oxidante, formación de partículas, agotamiento de agua, agotamiento recursos fósiles, que genera la incineración de los pallets y Solano (2018), analiza tarimas de maderas elaboradas en la región Huetar Norte de Costa Rica, comparándolas otras tarimas elaboradas con madera de otras regiones o importadas, su trabajo incluye las emisiones biogénicas³ como parte del impacto ambiental, en el cambio climático.

La mayoría de los estudios de ACV aplicados a la producción de tarimas son de casos europeos o estadounidenses, a excepción de los trabajos de Santos et al. (2016) realizado en Brasil y Solano (2017) que fue en Costa Rica.

No obstante en otros trabajos, también sobre tarimas de madera, y con una unidad funcional diferente, se analizan más categorías de impacto (Tabla 2).

Tabla 1. Diversos trabajos de ACV sobre tarimas de madera, donde se analizan distintas categorías de impacto.

Año de publicación	Autor(res)	Unidad Funcional	Categorías de Impacto	Método de evaluación
--------------------	------------	------------------	-----------------------	----------------------

³ Se emiten por los árboles de los grandes bosques, que participan en el ciclo global del carbono (Real Academia de Ingeniería, 2020).

2008	Gasó et al.	Transportar 1,000 t por carretera de un producto	Agotamiento de los recursos abióticos, potencial de calentamiento global, potencial del agotamiento del ozono, potencial de toxicidad humana, potencial de acidificación, potencial de eutrofización.	No se especifica
2011	Moadel	Una tarima de madera blanda	Carcinógeno, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidez terrestre, ocupación de la tierra, acuática, acidificación de la eutrofización acuática, calentamiento global, energía no renovable, extracción de minerales.	No se especifica
2014	Carrano et al.	100,000 viajes de tarimas	Huella de carbono	Impact 2002+ (incluye indicadores de Eco-indicator

				99 y CML 2001)
2018	Alanya et al.	Una media de la función del servicio o producto generado por la investigación del sistema.	Calentamiento global, acidificación, eutrofización, agotamiento de ozono, formación de humo, salud humana y ecotoxicidad.	Modelo de simulación
2018	Park et al.	Una tarima de madera reparada de 48 x 40 pulgadas (1,219 x 1,016 mm).	Calentamiento global	Declaraciones medioambientales de productos (siglas en inglés EPDs) 2006
2019	Kočí	Transportar 1,000 kg de carga	Cambio Climático, formación de partículas finas, agotamiento de fósiles, consumo de agua dulce, ecotoxicidad de agua dulce, eutrofización de agua dulce, toxicidad humana (cancer), toxicidad humana (no cancer), radiación ionizante, uso del suelo,	CML Leiden 2000

			ecotoxicidad marina, agotamiento de metales, información de ozono fotoquímico, ecosistemas, formación de ozono fotoquímico, salud humana, agotamiento del ozono estratosférico, acidificación terrestre, ecotoxicidad terrestre.	
--	--	--	---	--

1.3 Pregunta de investigación

¿Cuáles son los principales impactos ambientales potenciales a lo largo de su ciclo de vida de la producción de tarimas (pallet americano) en un aserradero ubicado en el municipio de Jacona del Plancarte, Michoacán?

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Analizar los impactos ambientales potenciales del proceso de producción de tarimas (pallet americano) y sus diferentes etapas de proceso (de la cuna a puerta del consumidor) de un aserradero ubicado en el municipio de Jacona del Plancarte, Michoacán, México.

1.4.2 Particulares

Para el proceso de producción (de obtención de madera, producción, hasta el envío a la empresa) de una tarima tipo pallet americano:

- Estudiar su sistema de producción (fases, etapas y flujos del proceso).
- Desarrollar el análisis del ciclo de vida del sistema.

- Identificar las oportunidades de mejora ambiental en el sistema.

2 Marco teórico

2.1 Metodología del análisis de ciclo de vida

Como ya se mencionó, hay interés de empresas aprovechadoras de madera en obtener los impactos ambientales de sus sistemas de producción (Niero *et al.*, 2014). Para esto, existen metodologías que permiten evaluar los impactos ambientales y sociales generados por un producto o servicio. Una de las metodologías es el ACV (Contreras, 2018; ISO, 2006).

La metodología de ACV comenzó a aplicarse en los años 60's y 70's, especialmente en Estados Unidos y Europa, al principio sólo se hacían estudios para empresas grandes, pues involucran costos altos. Sin embargo, en la década de los 80's tomó mayor importancia. Al desarrollar aún más este método, surgieron ciertas categorías de impacto, tales como cambio climático y agotamiento de los recursos, además, los estudios de ACV comenzaron a estar disponibles para el público (Rodríguez, 2003).

No fue, sino hasta el año 1993 que la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)⁴, formula el primer código internacional de prácticas de ACV, posteriormente la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) se une con la iniciativa. Es así, que en 1997 surge la norma ISO 14040, posteriormente, en el año 2000 surgiría la norma ISO 14042. La norma ISO 14040 estipula el marco general, principio y necesidades básicas para realizar un estudio de ACV, mientras que la ISO 14042, describe y establece una guía de la estructura general de la fase de Análisis del Impacto, Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (AICV) (Olvera, 2013; Estévez, 2016).

Un ACV se puede definir como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (Rodríguez, 2003). Las etapas con las que cuenta son las siguientes (Figura 1).

⁴ La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV (Rodríguez, 2003; Sane, 2012)

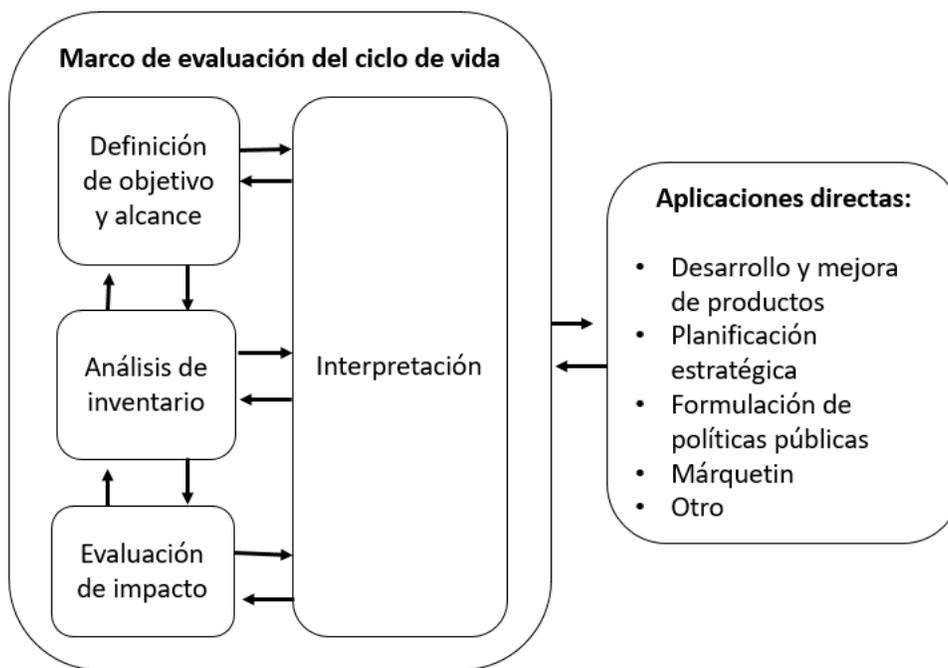


Figura 1. Metodología del análisis de ciclo de vida (Fuente: ISO, 2006)

1) Definición de objetivos y alcance.

Es la primera fase del ACV, en este apartado quedarán definidas las motivaciones del estudio. Especificando cuestiones como: ¿Por qué se llevará a cabo el estudio?, ¿Cuáles son las aplicaciones de los resultados obtenidos mediante el ACV?, así como ¿Quién es público al que va dirigido el estudio? (Ruiz & López, 2012; ISO, 2006).

Además de incluir los siguientes términos:

- **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 2).
- **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.

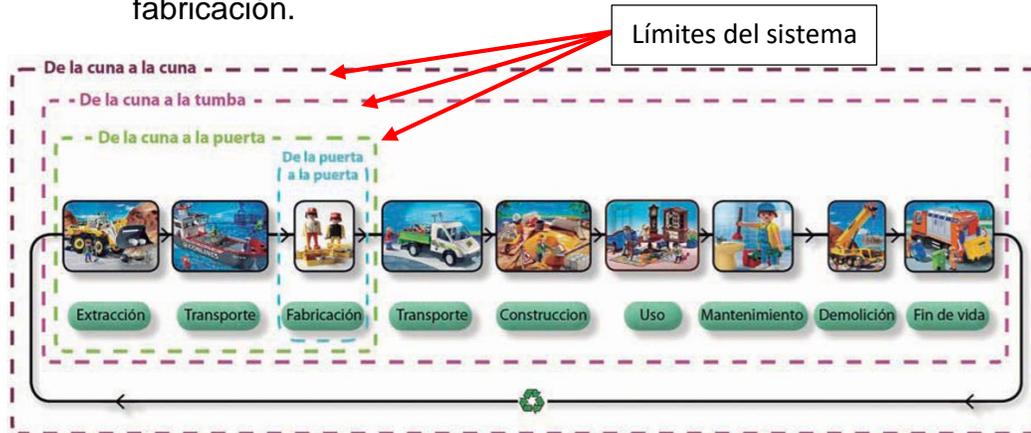


Figura 2. Etapas del ciclo de vida incluidas en los límites de sistema más usuales en ACV. (Fuente: Ruiz & López, 2012)

- **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, co-producto, emisiones al aire, agua y suelo) que se requiere para conformar a la unidad funcional (González *et al.*, 2012) (Ejemplo: una unidad funcional podría ser 100 botellas de plástico de un litro, entonces, el flujo de referencia son 100 botellas).
- **Métodos de asignación:** Se refiere a la distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes (Gerraín, 2010; Consorcio, 2012).

La norma ISO sugiere evitar las asignaciones y recomienda extender el sistema de estudio para abordar todos los productos y co-productos. No obstante, no es una tarea fácil, se requiere definir el producto o sistema a sustituir, además, es necesario obtener todos los datos que se requieren, los

cuales, no siempre están disponibles, por lo general se requieren previos ACV de los sistemas a sustituir. Como respuesta, la misma norma propone tres criterios distintos para asignar la carga ambiental: asignaciones físicas mediante masa, asignación física mediante energía y asignación por valor económico (Garraín *et al.*, 2010; Aguirre *et al.*, 2012; Ardente & Cerulla, 2012; Contreras-Gallegos, 2018). Las relaciones físicas como la masa o la energía se utilizan comúnmente como base para asignar los flujos de proceso entre los resultados útiles. También puede usarse el valor económico como base para la asignación; sin embargo, este enfoque debe usarse con precaución, ya que las fluctuaciones en los precios de los co-productos pueden cambiar los resultados y las conclusiones de un análisis, “Se reconoce como el método menos deseable y menos preciso” (Aguirre *et al.*, 2012; Klöpffer & Grahl, 2014).

2) Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

En esta fase se identifican y cuantifican los flujos físicos de materia y energía del sistema; entrada de materiales, semi-productos y productos, así como de salida de emisiones, residuos y productos para el sistema, y se normalizan a la unidad funcional, referido para el inventario de ciclo de vida (ISO, 2006; Heijungs, 2012; Ruiz & López, 2012; Contreras, 2018), en caso que, el sistema de producción analizado genera más de un producto se utiliza la regla de asignación. Por lo cual, los datos obtenidos son fundamentales para un buen ACV, y es necesario especificar el tipo de datos obtenidos: primarios o genéricos.

Los datos primarios se toman in-situ, 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). De acuerdo a Leiva (2016), es recomendable, que los datos obtenidos provengan directamente del sitio de estudio (Medidas “in situ”, balances de materia y energía, así como entrevistas y fuentes bibliográficas). Además de los datos cuantificados el inventario debe constar de: diagramas de flujo (describiendo el sistema y las relaciones entre los flujos), descripción detallada de cada unidad en el proceso, lista en donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro, descripción de los métodos empleados para recoger los datos y técnicas de cálculo para cada categoría. También es necesario validar los datos, la validación puede implicar el balance de materia, balance de energía y/o análisis comparativos de los factores de emisión.

3) Evaluación de impacto

El objetivo de esta fase es evaluar los impactos potenciales usando los resultados del inventario de ciclo de vida. Consta de dos elementos: obligatorios y opcionales.(ISO, 2006, Klöpffer & Grahl, 2014 & Contreras, 2018).

La diferencia radica, en que los elementos obligatorios, se generan de acuerdo con reglas científicas. Mientras que los elementos opcionales, dependen de opciones de valor y, por lo tanto, diferentes personas, organizaciones y grupos sociales puede llegar a conclusiones diferentes (Klöpffer & Grahl, 2014).

Elementos obligatorios:

- **Selección de las categorías de impacto⁵:** Referido a la clase que representa los problemas ambientales de interés a los que se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida (ISO, 2006).
- **Clasificación de los resultados de evaluación:** Su clasificación se relaciona a su capacidad de impactar algún indicador a lo largo de la ruta de impacto (Figura 3). En donde podremos encontrar indicadores de punto medio (midpoint) o de punto final (endpoint).
 - **Punto medio (“midpoint indicator”):** son aquéllos, ubicados en algún lugar a lo largo de la ruta de impacto entre la emisión y la categoría de punto final (Goedkoop *et al.* 2009; Contreras, 2018).
 - **Punto final (“endpoint indicator”):** Referido al atributo o aspecto del medio ambiente natural, la salud humana o los recursos, identificando un problema ambiental que causa preocupación, a esto también se le considera área de protección (ISO, 2006, Hauschild & Huijbregts, 2015; Contreras, 2018).

Estos son la representación cuantificable de una categoría de impacto sobre algún indicador (ISO, 2006). Las categorías de impacto deberán vincularse a las entidades que pretendemos proteger, las áreas de protección comúnmente aceptadas son: Salud Humana, Ambiente Natural y Recursos naturales (Margni & Curran, 2012; Hauschild & Huijbregts, 2015).

⁵ Valora la magnitud y significancia de los efectos ambientales y los clasifica en categorías (García, 2008).

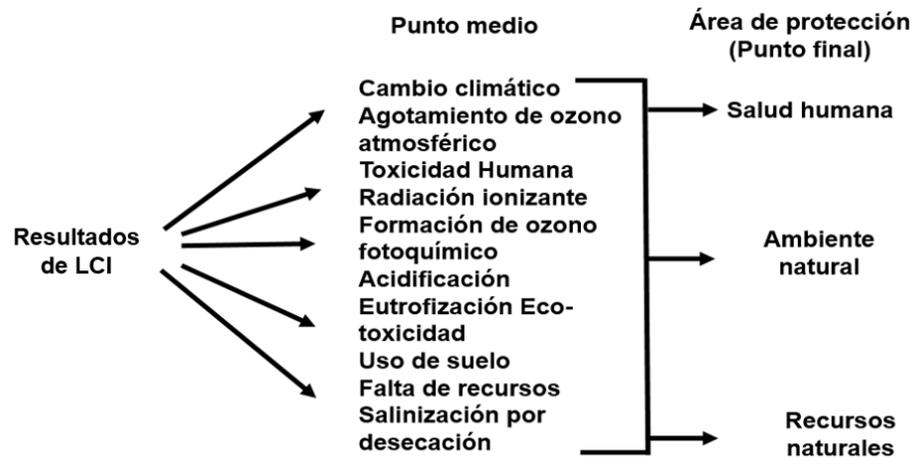


Figura 3. Diagrama de impactos de efectos intermedios, impactos de efectos finales y área de protección. Tomado de Gobierno Vasco (2017).

- **Caracterización de los resultados:** Para estos, son utilizados metodologías que indican el impacto ambiental por unidad, utilizando modelos ambientales que cuantifican la capacidad de cada flujo en impactar a las categorías de impacto definidas, ya sea de punto medio o punto final (ISO, 2006; Contreras, 2018).

Metodologías de punto medio: La mayoría de las primeras metodologías son basadas en métodos de punto medio, lo que significa que el indicador para una categoría de impacto se eligió en algún punto intermedio de la ruta de impacto: calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, toxicidad humana y acidificación. Éstas proporcionan una información más detallada sobre la manera y el punto en que afecta el medio ambiente, algunas metodologías son EDIP 96, y CML (se describe en el subtítulo 2.1.1) (Ramirez & Duque, 2009; Hauschild & Huijbregts, 2015).

Metodología de punto final: Son métodos que dirigen la evaluación de impacto contra indicadores ubicados al final de la ruta de impacto, como la salud humana, la calidad de los ecosistemas y la escasez de recursos, algunas metodologías son Eco-indicator 99 y EPS 2000 (Ramirez & Duque, 2009; Hauschild & Huijbregts, 2015)

Sin embargo, existen más metodologías que sólo las cuatro antes mencionadas, como se muestra en la figura 4.

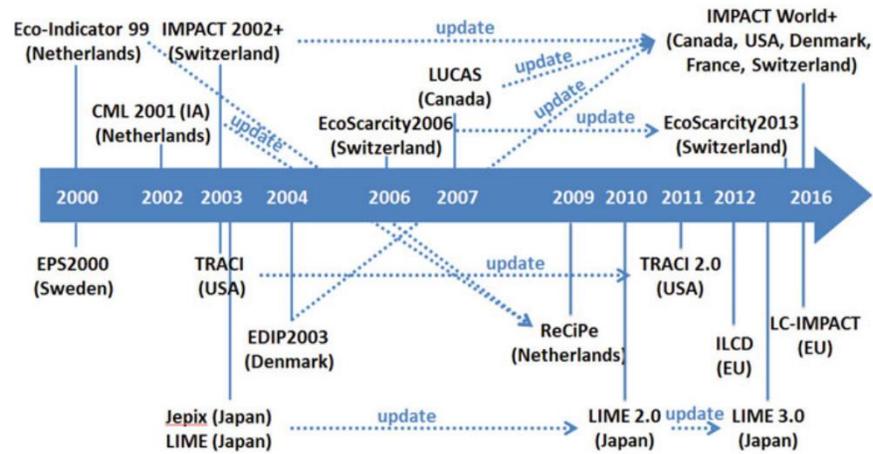


Figura 4. Metodologías publicadas de Impactos ambientales de ciclos de vida desde el año 2000. (Fuente: Rosenbaum, 2017)

Elementos opcionales:

- **Normalización:** Se refiere a proporcionar todos los indicadores de categorías en la misma unidad, es estándar y compara entre diferentes indicadores, al tiempo que afirma no aplicar ningún factor de ponderación (Rosenbaum, 2017).
- **Agrupamiento:** La agrupación proporciona una opción para resumir los resultados de los elementos anteriores obligatorios. Permite comparar categorías de impacto, ya sea, por medio de la agrupación o ponderación, clasificando a las categorías de acuerdo con la gravedad percibida (Klöpffer & Grahl, 2014; Contreras, 2018).

4) Interpretación

Esta fase de la evaluación del ciclo de vida en la que los resultados del análisis de inventario o la evaluación de impacto, o ambos, se evalúa en relación con el objetivo y el alcance definidos para llegar a conclusiones y recomendaciones (ISO, 2006). Se recomienda que se agreguen los siguientes elementos:

- Las cuestiones que se hayan identificado como significativas.
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.
- La pertinencia que tuvo la definición del sistema, la unidad funcional y los límites del sistema.
- Las limitaciones identificadas en función de la calidad de los datos y la sensibilidad del análisis.

2.1.1 Metodología CML.

La metodología CML es un método orientado al punto medio, desarrollado por primera vez en 1992 por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, Países Bajos (Menoufi, 2011).

Su objetivo es proporcionar las mejores prácticas para los indicadores de punto medio, poniendo en práctica la serie de normas ISO 14040. Incluye métodos recomendados para la normalización, pero no métodos recomendados para ponderar (JRC-IES, 2010).

El método CML agrupa las categorías de impacto en dos grupos: categorías de impacto obligatorio (categorías de impacto de línea base) que son las categorías de impacto utilizadas en la mayoría de los estudios de LCA, y categorías de impacto adicionales, que son categorías de impacto operativo que dependen de los requisitos del estudio (JRC-IES, 2010; Menoufi, 2011; Acero et al., 2017).

Las categorías de impacto de línea base son (JRC-IES, 2010; Menoufi, 2011):

- Agotamiento de recursos abióticos.
- Uso del suelo.
- Calentamiento Global.
- Agotamiento del ozono estratosférico.
- Ecotoxicidad (agua dulce y agua marina).
- Toxicidad Humana.
- Formación de fotooxidantes.
- Acidificación.
- Eutrofización.

Las categorías de impacto operativo son (JRC-IES, 2010; Menoufi, 2011):

- Pérdida de función de soporte vital.
- Pérdida de biodiversidad.
- Ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce.
- Ecotoxicidad de sedimentos marinos.
- Impactos de radiación ionizante.
- Aire maloliente.
- Ruido.
- Calor residual.
- Víctimas letales.
- No letales.
- Agotamiento de los recursos abióticos.
- Desecación y agua maloliente.

2.1.1.1 Categorías de impacto de línea base de la metodología de CML.

- Agotamiento de recursos abióticos:

Se consideran recursos abióticos aquellos que rodean a los seres vivos y que junto con ellos conforman el ecosistema; los recursos abióticos son parte de la naturaleza. Incluyen todos los recursos “sin vida” que pueden ser explotados por el hombre. Las estimaciones de las cantidades de recursos (elementos, minerales, combustibles) disponibles para las generaciones futuras dependen de la definición de reserva utilizada (reserva final, reserva extraíble en última instancia, reserva base y reserva económica) (Niembro & González, 2008).

La categoría de impacto “agotamiento de recursos abióticos” es un concepto que no se ha definido claramente aún, puesto que depende en gran medida del usuario, sus necesidades, habilidades y expectativas de futuro. Las elecciones realizadas para definir el modelo de caracterización darán como resultado diferentes conjuntos de caracterizaciones (Rodríguez, 2019).

Esta categoría tal como se define en la CML comprende solo el agotamiento de los recursos ambientales, sin incorporar la evaluación económica ni social. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg Sb_{eq} (Niembro & González, 2008; Rodríguez, 2019).

- Potencial de calentamiento global:

El cambio climático, también conocido como “efecto invernadero” o “calentamiento global”, comienza cuando la luz solar llega a la Tierra. Las nubes, las partículas atmosféricas, las superficies reflectantes del suelo y la superficie de los océanos devuelven aproximadamente el 30% de la luz solar al espacio, mientras que el resto es absorbido por los océanos, el aire y la tierra. A medida que la tierra se calienta, esta energía solar es irradiada por radiación térmica y rayos infrarrojos, propagándose directamente al espacio, enfriando así la Tierra. Sin embargo, parte de la radiación saliente es reabsorbida por dióxido de carbono, vapores de agua, ozono, metano y otros gases en la atmósfera y se irradia de regreso a la superficie de la Tierra. Estos gases se conocen comúnmente como gases de efecto invernadero debido a su capacidad de atrapar el calor (Stranddorf et al., 2005; Shahzad, 2015).

Cabe señalar que este proceso es bueno, ya que la temperatura media de la superficie de la Tierra sería muy fría si no existieran gases de efecto invernadero.

El problema comenzó cuando, las concentraciones de gases de efecto invernadero que han sido emitidas a la atmósfera artificialmente por las actividades humanas desde hace dos siglos. La radiación térmica es obstaculizada por los gases de efecto invernadero, lo que resulta en un fenómeno conocido como efecto de

calentamiento global. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg CO_{2eq} (Stranddorf et al., 2005; Shahzad, 2015).

Las sustancias consideradas como contribuyentes principales al calentamiento global son:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- CFCs (CFC-11, -12, -113, -114, -115)
- HCFCs (HCFC -22, -123, -124, -141b, -142b)
- HFCs (HFC-125, -134a, -152a)
- Tetraclorometano (CCL₄)
- 1,1,1-Tricloroetano (CCL₃CH₃)
- Monóxido de Carbono (CO)

- Agotamiento del ozono estratosférico:

La capa de ozono en la estratosfera protege la vida en la tierra de los rayos ultravioleta de la luz solar. El ozono estratosférico se concentra sobre todo entre 6 y 30 millas por encima de la superficie terrestre (López et al., 1995; EPA, 2001; Stranddorf, 2005).

Por medio de procesos atmosféricos naturales, las moléculas de ozono se crean y se destruyen continuamente en la estratósfera, manteniendo su concentración en equilibrio. Las radiaciones ultravioletas del sol descomponen las moléculas de oxígeno formando el ozono. La descomposición del ozono es reforzada por la entrada estratosférica de compuestos halogenados antropogénicos (por ejemplo: CFC, HCFC, halones, etc.) Los compuestos halogenados, son sustancias químicas orgánicas que contienen uno o varios átomos de un elemento halógeno (generalmente cloro, aunque existen compuestos formados con yodo y bromo). En la atmósfera se descomponen en cloro y bromo, que actúan como agentes catalizadores en la descomposición del ozono. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg CFC-11 (López et al., 1995; EPA, 2001; Stranddorf, 2005).

- Ecotoxicidad:

La toxicidad ambiental se mide como tres categorías de impacto separadas, que examinan el agua dulce, el mar y la tierra. La emisión de algunas sustancias, como los metales pesados, puede tener impactos en el ecosistema. La evaluación de la toxicidad se ha basado en concentraciones máximas tolerables en el agua para los ecosistemas. Los potenciales de ecotoxicidad se calculan con el USESLCA (el

Sistema uniforme para la evaluación de sustancias adaptado para propósitos de ACV), que se basa en EUSES, el modelo de toxicidad de la UE (Acero et al., 2021).

Proporciona un método para describir el destino, la exposición y los efectos de las sustancias tóxicas en el medio ambiente. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, kg 1.4 equivalente de diclorobenceno (1.4DB) (Acero et al., 2021).

- Toxicidad Humana:

Es el riesgo potencial relacionado con los efectos nocivos sobre la salud humana, debido a la exposición del medio ambiente (a través del aire, suelo y agua potable), en la medida en que estén relacionados con el cáncer y efectos no cancerígenos, como resultado de emisiones al medio ambiente de producción industrial, tráfico, centrales eléctricas, etc. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, kg 1.4 equivalente de diclorobenceno (1.4DB) (Stranddorf et al., 2005; ecoRae, 2013).

Aire: Las principales contribuciones a la toxicidad a través del aire son las emisiones del transporte y la producción de energía, las plantas de incineración de desechos, las emisiones industriales de COPL contaminantes orgánicos de VPH (alto volumen de producción).

Compuestos orgánicos volátiles (VOC): Los COV se liberan durante la quema de combustibles, como gasolina (el transporte es una de las principales fuentes de emisión de COV), madera, carbón o gas natural y también desde disolventes, pinturas, adhesivos, plásticos, aromatizantes y otros productos empleados en procesos industriales (ISTAS, 2010).

Partículas: También conocidas como partículas suspendidas, aeropartículas, material particulado y aerosoles, que son algunos de los términos utilizados para nombrar una mezcla de compuestos microscópicos o muy pequeños en forma de líquidos y sólidos suspendidos en el aire (por ejemplo: hollín, polvo, humo y neblinas) (Bracho, & Bravo, 2003).

Uno de los indicadores más recientes utilizados en medir las partículas en suspensión P_μ10 (partículas, que se cree que causan los principales problemas de salud, ya que pueden penetrar profundamente en las vías respiratorias (Stranddorf et al., 2005).

Agua: De acuerdo a Stranddorf et al. (2005), hay tres puntos en toxicidad humana a través del agua:

- Deposición de metales pesados y contaminantes pesados persistentes del aire (COP, son un conjunto de sustancias químicas que comparten cuatro características básicas:

persistencia, bioacumulación, potencial de transporte a gran distancia en el medio y efectos adversos.), podemos identificar como COP a los: Plaguicidas, PFOS, PBDE, PECB, HBB y PCB.

- Deposición de otras sustancias químicas emitidas al aire: datos de la sección de acidificación.
- Emisiones de plantas de tratamiento de aguas residuales; detergentes, metales, entre otros.

- Oxidación fotoquímica:

La oxidación fotoquímica (conocida también como smog) resulta cuando, los hidrocarburos (compuestos orgánicos conformados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno) o compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en la atmósfera, reaccionan con agentes oxidantes, tales como: especies OH, O₃, oxígeno atómico y óxido de nitrógeno (NO_x). Los contaminantes conformados pueden llegar a causar efectos más graves que los ocasionados por los hidrocarburos originales. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg C₂H₄eq (Bravo et al., 1992; Ávila, 2009, Sanhueza & Lissi, 2017).

- Acidificación:

Los océanos absorben alrededor del 27% o 30% del CO₂ atmosférico derivado de la quema de combustibles fósiles y de los cambios en los usos del suelo. La emisión de cada vez más y más CO₂ en la atmósfera, conlleva a que los océanos absorban mayores cantidades de dióxido de carbono a un ritmo cada vez más rápido. Cuando el CO₂ adicional liberado en la atmósfera se disuelve en el agua de mar, tienen lugar una serie de reacciones químicas que resultan en el proceso conocido como la acidificación oceánica, también denominado “el otro problema del CO₂” o “el gemelo malvado del cambio climático”). El CO₂ se disuelve en el agua de mar para formar ácido carbónico, cambiando la química de los océanos hacia condiciones más ácidas. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg SO₂eq (Castillo, 2015; Kim & Chae, 2016; PRTR, 2021).

- Eutrofización:

La eutrofización es un fenómeno en el que las aguas continentales están muy cargadas con un exceso de nutrientes, debido a los fertilizantes químicos o las aguas residuales vertidas, lo que provoca un rápido crecimiento de algas y mareas rojas (Kim & Chae, 2016).

Cuando se produce de forma natural, la eutrofización es un proceso gradual y lento, a diferencia de la eutrofización antrópica, que ocurre de forma acelerada con un aumento desordenado de la producción de biomasa fitoplanctónica, lo que imposibilita su incorporación por el sistema acuático a la misma velocidad de producción, provocando así un desequilibrio ecológico (García, 2018).

Un cuerpo de agua eutrofizado puede dejar de ser aprovechable para abastecimiento de agua potable, riego, recreación, pesca y turismo. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, Kg PO₄^{---eq} (Balcorta & Arenas, 2010).

2.2 Pallet de madera

De acuerdo con la norma ISO 445: los pallets son consideradas como “plataformas horizontales rígidas, cuya altura está reducida al mínimo compatible con su manejo mediante carretillas elevadoras, transpaletas o cualquier otro mecanismo elevador adecuado, utilizando como base para agrupar, apilar, almacenar, manipular y transportar mercancías y cargas en general” (ISO, 2013).

2.3 Tipos

De acuerdo con Mckeveer et al. (1986), el tipo de material empleado en la construcción de los pallets (madera dura o blanda, plástico o metal) es diferentes debido a las demandas de la industria y la distancia entre el productor y el consumidor. De tal forma que Mckeveer considera que dentro de los pallets existen los denominados pallets reusables y los pallets desechables, o conocidos también como no fungibles o multiusos (reusables) y de un solo uso o uso límite (Bilbao et al., 2011)

- Los pallets reusables tienen como característica su resistencia y durabilidad, además están diseñados para su uso prolongado (madera dura, plástico y metal).
- Los pallets desechables son aquellos que están hechos con madera blanda, menos cara y están diseñados para un número limitado de usos. Este tipo de pallets domina 88% del mercado mundial de pallets, al ser las más usadas por la industria para transportación a diferencia de sus análogas (Jones et al., 2011).

2.4 Clasificación

2.4.1 Estructura

En los pallets de madera se presentan dos estructuras, pallet de larguero (un larguero es un componente de un pallet que es una tabla sólida) y pallet de bloque (Bilbao et al. 2011).

- Pallets de larguero: Usan un marco de tres piezas paralelas llamadas largueros. Las tablas de la cubierta se colocan en ángulo recto con los largueros para crear la plataforma de carga (ver imagen 5a).
- Pallets de bloque: Son comúnmente más fuertes que los pallets de larguero. Utilizan largueros paralelos y perpendiculares para facilitar el manejo eficiente. Estos se extienden por toda la longitud del pallet de bloques (ver imagen 5b).

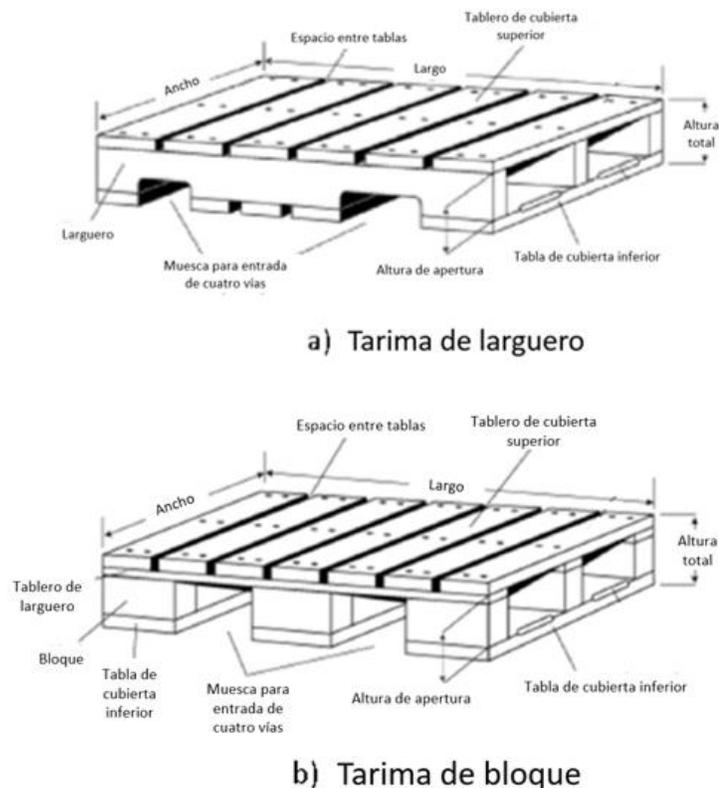


Figura 5. Tarimas de larguero y tarima de bloque. (Imágenes obtenidas de Bilbao et al. 2011).

Los pallets pueden llegar a tener una plataforma superior (denominada pallet de una cara o no reversibles), o pueden llegar a contar con dos plataformas; una superior y otra inferior (denominada reversible o de doble cara). Estas características, son

componentes de la estructura de un pallet, y pueden presentarse en los pallets de larguero y de bloque.

2.4.2 Tamaño

El tamaño de un pallet está determinado por la industria y los distintos destinos internacionales, sus variaciones son tan grandes, que tan solo en los Estados Unidos se han reportado 400 o más tamaños de pallets (Buehlmann et al., 2009; Jones et al., 2011).

Sin embargo, la Organización para la Estandarización (ISO) 6780, acepta seis tamaños estándar de pallets, dentro de los cuales son tres, los más importantes. (Buehlmann et al., 2009; Bhattacharjya et al. 2012):

- Un pallet de 1100x1100 mm en Asia (pallet asiático).
- Un pallet de 1200x800 mm en Europa (pallet europeo).
- Un pallet de 1219x1016 mm en Estados Unidos (pallet americano).

El tamaño de pallet analizado en este estudio, es el pallet americano, el cual, lo nombraremos tarima VG (tarima de vegetales), debido a que así es como lo maneja el aserradero Tarimas Vicar.

2.4.3 Aspectos Fitosanitarios (NIMF-15)

La nueva reglamentación fitosanitaria NIMF-15 (Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias) entró en vigor en el 2004 y se aplica a pallets y embalajes de madera para exportación.

Esta norma exige dos requisitos imprescindibles: la primera es un certificado de origen del pallet y la segunda es un tratamiento de desinfección, que busca eliminar plagas que se encuentren en la madera, puede ser de forma térmica o con fumigación con bromuro de metilo. Estos tratamientos se explican a continuación.

2.4.3.1 Tratamiento térmico

Este tratamiento es permanente. Para llevarse a cabo puede ser utilizado cualquier medio de energía: vapor, secado en estufa, impregnación química a presión inducida mediante calor (conocidos como forma convencional) y el calentamiento dieléctrico (microondas), siempre que se ajusten a los parámetros de la norma.

Cuando se utilicen el tratamiento térmico (código de tratamiento HT), la madera deberá alcanzar una temperatura de 56 °C durante un período mínimo de 30 minutos en todo el perfil de la madera.

Cuando se utilice tratamiento dieléctrico (Código de tratamiento DH), deberá alcanzar una temperatura máxima de 60 °C durante un minuto continuo en todo el perfil de la madera y debe mantener su temperatura por 30 minutos.

2.4.3.2 Bromuro de Metilo

La temperatura mínima de la madera y de la atmósfera que la circunda no debe ser inferior a 10 °C y el tiempo de exposición mínimo no debe ser inferior a 24 horas. Para su uso más específico, existe un programa elaborado por la ONPF (Organización Nacional de Protección Fitosanitaria), donde especifican la concentración-tiempo mínima del producto (CT⁶) en el tiempo estimado de 24 horas y con la concentración residual (gas) especificadas en la Tabla 1 (FAO, 2013).

Tabla 2. CT mínima durante 24 horas para el embalaje de madera fumigado con bromuro de metilo. Elaboración propia con datos de FAO (2013).

Temperatura (°C)	CT (g*h/m ³) durante 24h	Concentración final mínima (g/m ³) después de 24 h*
21.0 o superior	650	24
16.0-20.9	800	28
10.0-15.9	900	32

*En los casos en los que no se alcance la concentración final mínima después de 24 horas, se permitirá una desviación en la concentración del ~5% siempre que se agregue tiempo de tratamiento adicional al final del tratamiento para alcanzar la CT prescrita.

De acuerdo con el Marco de Protocolo de Montreal⁷ el bromuro de metilo provoca agotamiento de la capa de ozono, por lo cual, su uso debe ajustarse a la recomendación de la Comisión de Medidas Fitosanitarias (CMF), sobre el reemplazo o su reducción (PNUMA, 2006; CIPF, 2017).

⁶ La CT utilizada para el tratamiento con bromuro de metilo de acuerdo con la norma de la ONPF, es la suma del producto de la concentración (g/m³) y el tiempo (h) a lo largo de la duración del tratamiento.

⁷ El Protocolo de Montreal es un acuerdo ambiental internacional que logró ratificación universal para proteger la capa de ozono de la tierra, con la meta de eliminar el uso de sustancias que agotan la capa de ozono (PNUD, 2020)

2.4.3.3 Elementos de Unión

Para la unión de las tarimas de madera existen clavos, grapas, pernos, tornillos para madera, y tornillos de tracción. Estos elementos (Imagen 6) pueden afectar las propiedades y el rendimiento de las tarimas. Es importante que tengan una resistencia mayor o igual a 690 MPa y su penetración debe ser de 32 mm en el larguero o tacón y una penetración de 25 mm para tablas de 13 mm (Parra, 2019).

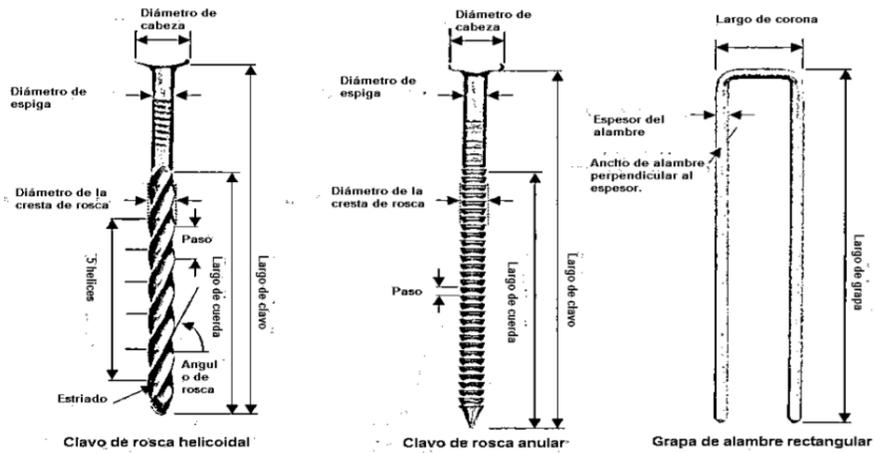


Figura 6. Elementos de unión impulsados para tarimas (Tomada de Parra, 2019).

3 Marco metodológico

3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Para analizar los impactos del sistema de producción de una tarima VG, es necesario desarrollar un ACV con las etapas anteriormente mencionadas: 1) definición del alcance y objetivos, 2) análisis de inventario, 3) evaluación de impactos y, 4) interpretación (ISO, 2006).

3.1.1 Definición de objetivo y alcances

El objetivo de este ACV es, analizar los impactos ambientales potenciales del proceso de producción de tarimas (pallet americano) en sus diferentes etapas de proceso en un aserradero situado en el municipio de Jacona del Plancarte, Michoacán, mediante un Análisis de Ciclo de Vida (cuna a puerta del consumidor).

Los resultados mostrarán los procesos del sistema que más emisiones de CO_{2eq} emiten, los llamados “puntos calientes” o “hotspot (en inglés)”, es decir, aquellas etapas del proceso donde se encuentran mayores impactos ambientales. Esta información será entregada al dueño del aserradero, que podrá decidir hacer cambios en su proceso de producción de tarimas para mejorar el impacto ambiental.

Acorde con la investigación bibliográfica, no se encontró un estudio antecedente de ACV de tarimas de madera hecho en México, con el cual se pudiera comparar los resultados de la presente investigación, lo que justifica la relevancia e innovación del presente estudio. Con la información obtenida se establecen las bases para futuros proyectos de ACV en producción de tarimas VG, lo que proporcionaría información necesaria para identificación de puntos de mejora en términos de desempeño ambiental para la cadena de producción de estos importantes productos dentro del contexto nacional.

3.1.1.1 Unidad funcional

De acuerdo con la ISO 14040, una unidad funcional debe ser claramente definida y medible, con el propósito de proveer de una referencia con la cual, las entradas y salidas puedan normalizarse. Atendiendo a esto, al objetivo y la función del sistema, la unidad funcional aquí estudiada fue un pallet americano (conocido comúnmente como tarima VG).

Este tipo de tarima fue elegida como unidad funcional entre los otros tipos de tarimas producidas en el aserradero dada su mayor importancia económica, nivel de producción y demanda. La tarima VG (figura 7) está conformada por 3 barrotes (figura 8A) y 12 duelas (tablas) (figura 8B), unidas con clavos rolados (72 clavos en total por tarima) (figura 8C).



Figura 7. Pallet americano (tarima VG).



Figura 8. Partes que conforman una tarima VG (pallet americano). A) Barrote, B) Duela, C) Clavo rolado.

3.1.1.2 Límites del sistema

Los límites del sistema definidos en esta investigación corresponden de “Cuna a puerta de salida del productor” (ver figura 9). Tarimas Vicar, cuenta con seis etapas de producción distribuidas en tres fases:

- **Fase de extracción de madera:** Cuenta con una sola etapa, asignándole así el mismo nombre “etapa de extracción de madera”.
- **Fase de producción:** Está dividida en tres etapas: cuarteado, hojeado y recortado.
- **Fase de ensamble:** Dividida en dos etapas: armado y tratamiento térmico.

Las principales entradas/insumos del proceso productivo de la empresa son: madera, combustibles (gasolina y diésel), electricidad y clavos. Durante el proceso de producción, las salidas que presenta el sistema son: emisiones, subproductos (tarimas 5/8, tarimas de colado, aserrín y leña aprovechable) y finalmente, tarimas VG. Además, se generan flujos residuales como pedacera y leña de descarte.

El proceso de producción de tarimas VG inicia con la extracción-recolección de la materia prima (truncos de madera) en el municipio de Concepción de Buenos Aires, Jalisco. Posteriormente, la materia prima se transporta al aserradero Tarimas Vicar; una vez que se encuentra disponible la materia prima en el aserradero, se llevan a cabo la fase de producción de tarimas, en la cual la madera se transforma mediante las ya mencionadas etapas de: cuarteado, hojeado y recortado. Los flujos de salida de esta primera etapa (duelas y barrotos) se transportan a la fase de ensamble, donde se lleva a cabo las etapas de armado y tratamiento térmico (proceso en el cual, las tarimas son sometidas a altas temperaturas, disminuyendo así su porcentaje de humedad a un 20%), teniendo como producto final a las tarimas VG.

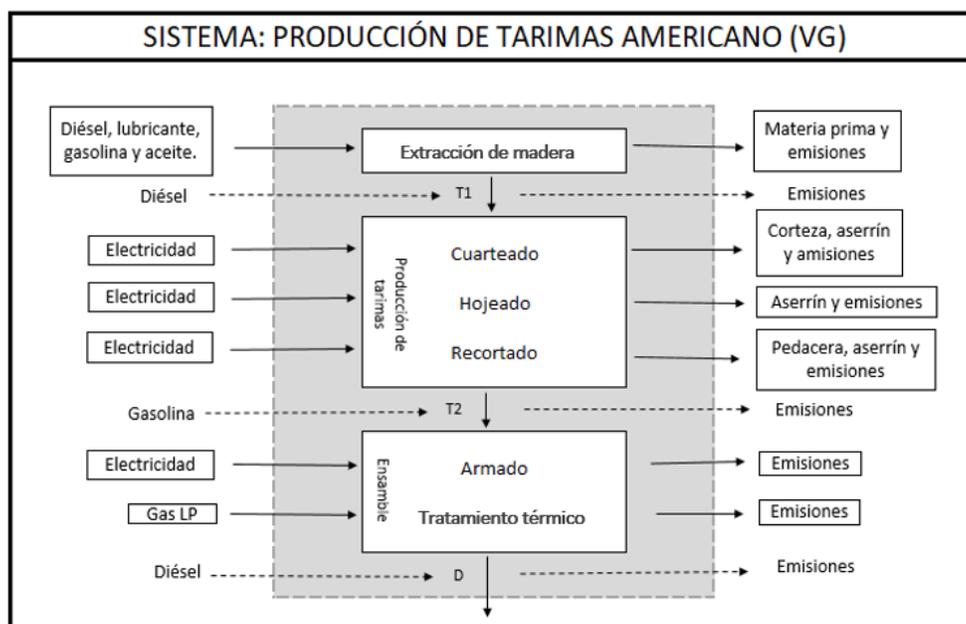


Figura 9. Límites del sistema de la producción de tarimas VG en Zamora, Michoacán. "T1" y "T2" son transportes y "D" significa distribución.

3.1.2 Análisis de inventario

3.1.2.1 Obtención de datos primarios.

La toma de datos se realizó en dos visitas a la empresa, la primera fue en el mes de junio 2020 y la segunda fue en el mes de noviembre del mismo año. Durante la primera visita, se hizo un recorrido por las instalaciones, al mismo tiempo se aplicó una entrevista semi-estructurada (anexo 1) al dueño de la empresa, mediante la encuesta fueron identificadas las etapas de producción, los productos, co-productos, así como sus insumos (gasolina, diésel, gas LP y electricidad).

La empresa está dividida en dos instalaciones (Figura 10), una se encarga de procesar los rollos de madera para formar los elementos de las tarimas (barrotes y duelas) (Figura 21-A) y la otra se encarga del ensamble de estas, así como del tratamiento térmico (Figura 21-B).

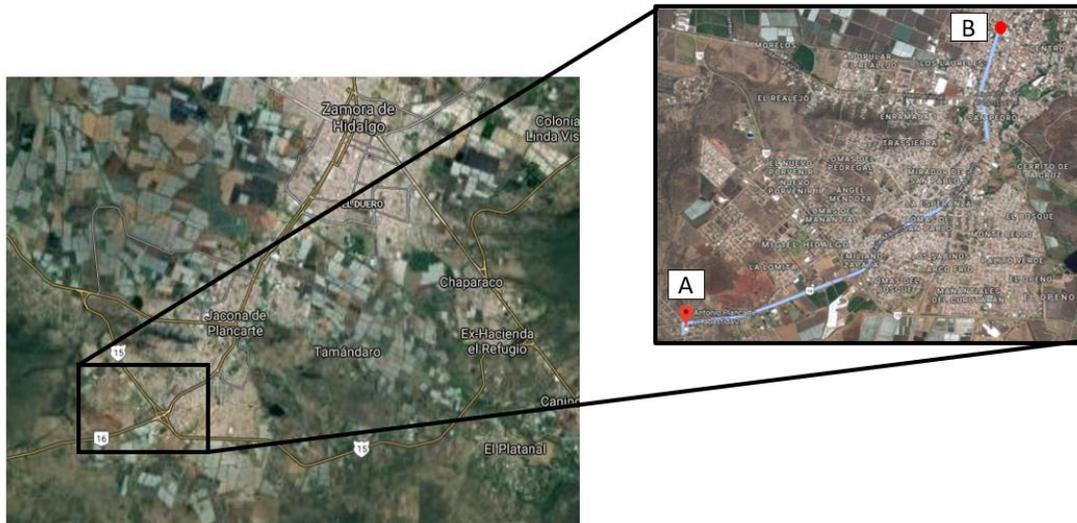


Figura 10. Fotografía aérea, donde se indican las dos instalaciones de la empresa.

Referente al insumo de electricidad, no fueron medidos los consumos directos de los equipos, sin embargo, el consumo de electricidad fue obtenido mediante los recibos de luz (CFE) proporcionados por la empresa (para la estimación del consumo eléctrico se utilizó el promedio de tres recibos).

Durante la segunda visita, fue necesario pesar las tarimas, así como, cada uno de los elementos que las conforman y otros flujos de la producción como la generación del aserrín y las pedaceras, para ello, se utilizó una báscula Smart weigh PRO POCKET SCALE TOP2KG (Figura 11A), una báscula “escala de gancho multifuncional” con capacidad para 50 kg (Figura 11B); también fue necesario medir el porcentaje de humedad de cada elemento, por lo que fue utilizado un medidor digital de humedad PROSTER, modelo: PST049 (Figura 11C).



A



B



C

Figura 11. Aparatos usados en la segunda visita: A) báscula Smart weigh PRO POCKET SCALE TOP2KG, B) báscula “escala de gancho multifuncional” y C) PROSTER, modelo: PST049.

- **Pesaje de tarimas**

El total de tarimas pesadas fueron seis: tres del tipo americano (VG) y tres del tipo europeo (5/8). También se midieron los porcentajes de humedad, para cada tarima, para lo cual se tomaron nueve mediciones en lugares seleccionados de manera aleatoria, obteniendo así un promedio del parámetro humedad.

- **Pesaje de elementos de tarimas**

Primero fueron pesadas con la báscula PRO POCKET SCALE las duelas VG (figura 12) y las duelas 5/8 (Figura 13), ocho duelas en total (cuatro por cada tipo de duela). El porcentaje de humedad, se midió en cuatro puntos de cada duela: uno en cada lateral largo y otro en cada lateral corto.

La diferencia entre duelas es su espesor, las duelas VG son más anchas que las duelas de 5/8.



Figura 12. Duelas VG.



Figura 13. Duelas 5/8.

En el caso de los barrotes se empleó la báscula de escala de gancho multifuncional, estos se pesaron dos veces. El primer pesaje fue cuando al barrote aún no le recortaron las dos ranuras (características en las tarimas) (Figura 14) por donde entrarán los brazos del montacargas, el segundo pesado se hizo, una vez que fueron hechas las mencionadas ranuras (Figura 15). El porcentaje de humedad se midió de la misma forma que la duelas, cuatro mediciones una por cada lado lateral del barrote.



Figura 14. Barrote sin ranuras.



Figura 15. Barrote con ranuras.

Los clavos (Figura 16) se pesaron con la báscula PRO POCKET SCALE. Se obtuvo el promedio del pesaje de tres clavos.



Figura 16. Clavo rolando utilizado para armar los elementos de madera que conforma la tarima.

3.1.2.2 Obtención de datos genéricos

La información secundaria, principalmente en la etapa de extracción de la madera fue obtenida de la tesis de Contreras (2019), que analiza un aserradero ubicado en el mismo estado de Guadalajara donde la empresa estudiada compra la madera en rollo. Ella utiliza base de datos de Ecoinvent 3.1 “la cual es una de las bases de datos más utilizadas para el inventario de ciclo de vida, así como para otras aplicaciones, tales como las declaraciones ambientales de productos y el eco-etiquetado. Dicha base contiene datos de inventario de ciclo de vida de energía, materiales, plásticos, gestión de residuos, transportes, productos y procesos agrícolas, entre otros” (Contreras, 2019).

3.1.3 Evaluación de impacto.

3.1.3.1 Metodología CML

Se empleará la metodología CML como método para la evaluación de impacto. Esta metodología aporta categorías de impacto de punto medio, las cuales son frecuentemente más empleadas (Goedkoop et al. 2009; Contreras, 2018), motivo por el cual fue seleccionado este método de evaluación, para hacer una comparación con otros estudios antecedentes.

La metodología CML incluye las categorías de impacto que se analizarán:

1. Agotamiento abiótico.
2. Agotamiento abiótico (combustibles fósiles).
3. Calentamiento global.
4. Agotamiento de la capa de ozono.
5. Toxicidad humana.
6. Ecotoxicidad acuática de agua dulce.
7. Ecotoxicidad acuática marina.
8. Ecotoxicidad terrestre.
9. Oxidación fotoquímica.
10. Acidificación.
11. Eutrofización.

Para la etapa de evaluación de impacto se empleó el software SimaPro 8.3, el cual, permite una visión total de las bases de datos y los procesos unitarios, esto brinda plena capacidad para analizar y modificar las elecciones y suposiciones, que contemplarán al estudio (SimaPro, 2011). La base de datos con la que se trabajó en SimaPro, fue elaborada en Excel con información específica del caso de estudio mediante trabajo en campo y visitas a la empresa.

3.1.3.2 Identificación de trabajos antecedentes con la misma unidad funcional.

La misma metodología de ACV, recomienda usar las categorías de impacto que más convenga al sistema de estudio, por esta razón, se puede encontrar trabajos, donde analizan un sistema de producción de tarimas con la misma unidad funcional que maneja este estudio, tales como: Gajardo (2020), cuyo trabajo evalúa el potencial de calentamiento global que genera la fabricación de pallets en Chile, Solano (2018), cuyo trabajo analiza el efecto sobre la categoría de cambio climático de las tarimas de madera elaboradas en la región Huetar Norte de Costa Rica, Niero et al. (2014), estudio hecho en un sistema de producción de tarimas de madera en Italia, Ruisheng et al. (2014), estudio hecho en una planta recicladora de residuos de madera en Singapur.

Niero et al. (2014) analizan 5 categorías de impacto: cambio climático, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana, formación de partículas, uso de tierra. Mientras que Gajardo (2020), Solano (2017) y Ruisheng et al. (2014) analizan sólo huella de carbono.

3.1.3.3 Método de asignación

Debido a las recomendaciones de la ISO 14040 mencionadas anteriormente en el subtítulo 2.1 Metodología del análisis de ciclo de vida, el método de asignación seleccionado en el presente trabajo, fue una asignación másica, debido a que otro tipo de asignación, como la económica puede variar con el tiempo, mientras que la asignación másica generalmente permanece relativamente constante. Para ello fueron utilizados los pesos de las tarimas VG y los respectivos pesos de los sub-productos y residuos presentes en el sistema para repartir los impactos ambientales de acuerdo con la propiedad física de masa.

4 Resultados y Discusión

En este capítulo se presentarán el inventario de ciclo de vida del proceso de interés, la evaluación de impacto ambiental y la interpretación de los resultados del ACV. También se identifican las etapas del sistema en dónde ocurren los principales impactos ambientales potenciales (conocidos comúnmente como hotspots).

4.1 Descripción del proceso de fabricación de tarimas de madera VG

0. Extracción de madera (Cuna)

La madera en rollo consumida por la empresa y con la cual se construyen las tarimas, la adquieren de un aserradero ubicado en Concepción de los Aires, Jalisco, hasta su destino, en Jacona del Plancarte, Michoacán, municipio donde opera la empresa (ver figura 17). La distancia entre los sitios mencionados es de 144 km. Es importante señalar que para esta sección inicial no se obtuvieron datos primarios (no hubo una visita ni entrevista a los productores forestales), en su lugar se emplearon datos genéricos obtenidos de la metodología CML (Contreras, 2018).



Figura 17. Ruta del transporte de madera en rollo, inicia en Concepción de los aires, Jalisco y termina en Jacona del Plancarte, Michoacán.



Figura 18. Camión Freightliner 2000, descargando madera en rollo a la empresa. Tomada por el autor.

Transporte 1.

Para llevar la madera en rollo del estado de Jalisco hacia el municipio de Jacona del Plancarte, Michoacán, México, se utiliza un camión Freightliner 2000 (Figura 18) con una capacidad de 18 a 20 m³. El combustible que utiliza el camión es diésel, y éste recorre (en el trayecto ya mencionado) 288 km (ida y vuelta). Dos viajes son requeridos por semana, en cada uno de ellos son transportados 18 m³ de madera en rollo, es decir 36 m³/semana que son equivalentes a 7.9 Ton de madera (considerando una densidad de la madera de 0.51 t/m³) (Contreras, 2018), que entrarán al “Cuarteado” de la segunda fase “Producción de tarimas” (Figura 9).

1. Cuarteado

En esta etapa, la madera en rollo, es procesada por medio de una sierra, obteniendo así, cuartones (Figura 19). Estos se forman cuando la madera en rollo (el tronco) es cortado en varios pedazos longitudinalmente, formando una especie de prisma rectangular. El grosor es de nueve centímetros, medida estándar para duelas (VG o 5/8) y barrotes.



Figura 19. Imagen de un cuartón. Tomada por el autor.

Debido a que la forma de los troncos no es regular, muchas veces quedan pedazos de madera, lo suficientemente grandes como para ser aprovechados en la producción de tarimas de colado (co-producto que la empresa produce). A estos pedazos se les denomina leña aprovechable, por lo cual, también se llevan a la siguiente etapa, denominada “Hojeado”.

2. Hojeado

En esta etapa, los cuarterones son procesados en una segunda sierra. El corte es de forma longitudinal, y el grosor (al igual que la etapa de cuarteado) dependerá de lo que se requiera producir (Figura 20), por ejemplo: Un grosor de dos pulgadas, corresponde a la generación de barrote, un grosor de una pulgada, corresponde a la generación de duelas VG y un grosor de 5/8 corresponde a la generación de duelas 5/8.



Figura 20. Proceso de hojeado. Tomada por el autor.

3. Recortado

Es la etapa final de la fase de producción y en donde se obtienen los elementos de madera que conforman a la tarima. Las tablas VG (Figura 21) y 5/8 (Figura 22), se recortan en uno de sus extremos, a una longitud de 1.2 m y las tablas para barrote (Figura 23), además de ser recortadas en uno de sus extremos, como a las duelas, se recortan dos ranuras justo en uno de los laterales más largos, una vez, hecho las ranuras, se le denominarán barrote luna (Ver imágenes 14 y 15).

Durante el proceso, se genera pedacera y aserrín. La pedacera, a diferencia del aserrín, no tiene un valor económico, por lo que no se considera un co-producto y en la actualidad, sólo es desechado de proceso.



Figura 21. Imagen de una duela VG. Tomada por el autor.



Figura 22. Imagen de una duela 5/8. Tomada por el autor.



Figura 23. Imagen de un barrote. Tomada por el autor.

Transporte 2.

Para transportar los barrotes luna y duelas de la fase de producción de tarimas hacia la fase de ensamble, se emplea una camioneta Toyota del año 1994 (Figura 24). El combustible utilizado es gasolina, y recorre (en la trayectoria ya mencionada) 190.8 km en una semana.



Figura 24. Imagen de la camioneta Toyota. Tomada por el autor.

4. Armado

Como su nombre lo indica, es la etapa donde los elementos de las tarimas se unen. Para ello se emplean pistolas de aire (Figura 25), que lanzan clavos rolados, formando así, a las tarimas.



Figura 25. Imagen de una pistola de aire, herramienta con la que unen los distintos elementos que conforman la tarima. Tomada por el autor.

5. Tratamiento térmico

En esta etapa, las tarimas VG son introducidas en un horno de gas LP (Figura 26), en un periodo de una semana (lunes a sábado), el horno se usa 24 horas (4 horas por día).



Figura 26. Imagen del horno de gas LP en Tarimas Vicar. Tomada por el autor.

Distribución

Para llevar las tarimas VG, de la empresa hacia el consumidor, se utiliza una camioneta Ford del año 1979 (Figura 27), el combustible que utiliza es diésel y recorre a la semana 151.2 km.



Figura 27. Imagen de la camioneta Ford. Tomada por el autor.

4.2 Inventario de datos primarios.

El diagrama de proceso de la empresa (Figura 28) se identificaron las seis etapas del sistema productivo, para las cuales se generó su correspondiente balance de materia.

Además, muestra: los flujos de referencia (en color verde, flujos que conformarán una tarima VG), co-productos (en color naranja), desechos (en color rojo), presentes en el sistema de estudio, las flechas verdes punteadas, representan el transporte dentro de la empresa, la flecha negra punteada indica la distribución de las tarimas, las flechas verdes indican transiciones entre etapas, las flechas rojas indican aquellos co-productos o desechos que salen del sistema de estudio, es decir, no se hará un seguimiento como con la unidad funcional, por último, las flechas y el color en negro, indican los insumos que entran al sistema de estudio.

CUNA

Etapa 0. Extracción

Transporte 1°



Etapa 1.- Cuarteado					
Entradas	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)	Salidas	Cantidad (kg)	Porcentaje (%)
F1. Madera en Rollo	7920	100	F2. Cuartón	5742	72.5
			F4. Leña aprovechable	1584	20
			F3.1 Aserrín	594	7.5

Etapa 2.- Hojeado					
Entrada	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)	Salida	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)
F2. Cuartón	5742	72.5	F5. Tabla VG	2328.28	31.78
F4. Leña aprovechable	1584	20	F3.2 Aserrín	11.48	0.20
			F6. Tabla 5/8	1140.31	19.86
			F3.3 Aserrín	11.48	0.20
			F7. Barrote	2238.96	38.99
			F3.4 Aserrín	11.48	0.20
			F8. Leña de descarte	871.2	11
			F9. Tablas tarimas de colado	673.2	8.5
			F3.5 Aserrín	39.6	0.5



Etapa 3.- Recortado					
Entrada	Cantidad (kg)	Porcentaje (%)	Salida	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)
F5. Tabla VG	2328.28	31.78	F10. Duela VG	2298.84	31.38
F6. Tabla 5/8	1140.31	19.86	F13.1 Pedacera	24.79	0.34
F7. Barrote	2238.96	38.99	F3.6 Aserrín	4.64	0.06
			F11. Duela 5/8	1119.00	19.488
			F13.2 Pedacera	17.95	0.313
			F3.7 Aserrín	3.36	0.059
			F12. Barrote luna	1731.47	30.15
			F13.3 Pedacera	427.43	7.44
			F3.8 Aserrín	80.05	1.39

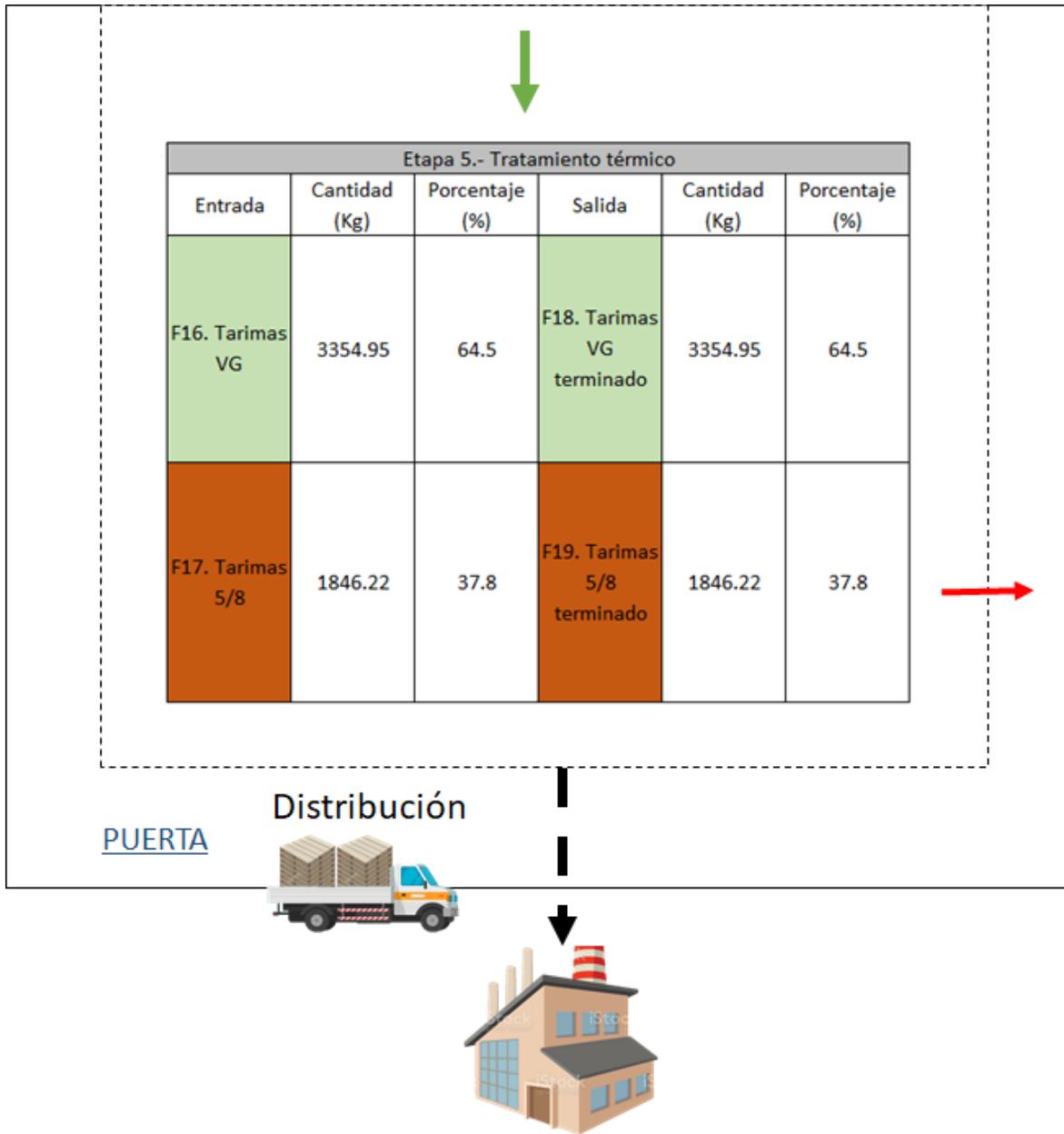


Transporte 2°



Etapa 4.- Armado						
Entrada	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)	Salida	Componentes	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)
F10. Duela VG	2298.84	31.38	F16. Tarimas VG	Barrote luna VG	3354.95	19.41
F11. Duela 5/8	1119.00	19.49		Duela VG		44.20
F12. Barrote luna	1731.47	30.15		Clavos rolados VG		0.90
I1. Clavos rolados VG	46.58		F17. Tarimas 5/8	Barrote luna 5/8	1846.22	14.20
I2. Clavos rolados 5/8	33.73			Duela 5/8		22.91
				Clavos rolados 5/8		0.69





↓	↓	↓	↓	→	←	↓	↓
Flujos de referencia	Co-producto	Desecho	Transición de etapas	Salidas del sistema	Insumos	Transporte	Distribución

Figura 28. Diagrama de proceso de la empresa. Las letras “F” significan flujo de materia, enumeradas por orden de proceso, comenzando con el 1 hasta el 19. Las letras “I” significan insumos, enumerados también por orden de proceso.

4.3 Evaluación del sistema

En esta sección se presenta el análisis de inventario del caso de estudio, en cada proceso del sistema se marcan con una “E” a los equipos y con una “F” a los diferentes flujos (insumos) de materiales y energía empleados para la construcción de un pallet americano (Tabla 3). Los insumos del sistema se componen principalmente por combustibles fósiles (gasolina, diésel, gas LP) y electricidad, estos se reportan en una escala temporal de producción por semana.

Tabla 3. Análisis de inventario: Procesos y consumos por una semana de producción. Flujos escritos con rojo corresponden a flujos de referencia.* Debido a que éste sistema es multiproducto, se requirió de asignaciones másica, ** Para cada uno de los flujos del inventario se fue calculando su respectiva huella de carbono.

Etapa	Flujos/equipos	Co-productos	Cantidad	Unidad	Asignación*	Huella de carbono (kgCO2eq)**
Extracción	E1 Motosierra	Petrol, unleaded, burned in machinery {GLO} market for petrol, unleaded, burned in machinery APOS, U	672	MJ		56.3
		Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil APOS, U	2.38	kg		2.99
	E2 Grúa	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural machinery APOS, U	354	MJ		28.4
	F1 Madera en rollo (36 m³/semana)	Madera en rollo extraída	7.92	ton	100%	87.7

Transporte 1	F1 Madera en rollo (36 m ³ /semana)	Madera en rollo extraída	7.92	ton		87.7
		Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	4.15E+03	tkm		1.69E+03
		Madera en rollo transportada	7.92	ton	100%	1.78E+03
Cuarteado	F1 Madera en rollo (36 m ³ /semana)	Madera en rollo transportada	7.92	ton		1.78E+03
	E3 Sierra	Electricity, medium voltage {MX} market for APOS, U	198.5	kWh		112
	F2 Cuartón	Cuartón	5.742	ton	72.5%	1370.0
	F3.1 Aserrín	Aserrín	0.594	ton	7.5%	141.7
	F4 Leña aprovechable	Leña aprovechable	1.584	ton	20%	377.9
Hojeado	F2 Cuartón	Cuartón	5.742	ton		1370.0
	F4 Leña aprovechable	Leña aprovechable	1.584	ton		377.9
	E4 Sierra	Electricity, medium voltage {MX} market for APOS, U	148.88	kWh		84.1
	F5 Tabla VG	Tabla VG	2.33	ton	32%	583.1
	F6 Tabla 5/8	Tabla 5/8	1.14	ton	16%	285.3
	F7 Barrote VG	Barrote VG	2.24	ton	31%	560.6
	F8 Leña de descarte	Leña de descarte	0.87	ton	12%	217.8
	F9 Tablas tarimas de colado	Tablas tarimas de colado	0.67	ton	9%	167.6
F3.2; F3.3; F3.4 y F3.5 Aserrín	Aserrín	0.07	ton	1%	17.6	

Recortado	F5 Tabla VG	Tabla VG	2.33	ton		583.1
	F6 Tabla 5/8	Tabla 5/8	1.14	ton		285.3
	F7 Barrote	Barrote VG	2.24	ton		560.6
	E5 Sierra	Electricity, medium voltage {MX} market for APOS, U	119.1	kWh		67.2
	F10 Duela VG	Duela VG	2.3	ton	40%	603.0
	F11 Duela 5/8	Duela 5/8	1.12	ton	20%	293.3
	F12 Barrote luna VG	Barrote luna VG	1.73	ton	30%	453.4
	F13.1; F13.2 y F13.3 Pedacera	Pedacera	0.47	ton	8%	122.7
	F3.6; F3.7 y F3.8 Aserrín	Aserrín	0.08	ton	2%	23.9
Transporte 2	F10 Duela VG	Duela VG	2.3	ton		603.0
	F11 Duela 5/8	Duela 5/8	1.12	ton		293.3
	F12 Barrote luna VG	Barrote luna VG	1.73	ton		453.4
		Transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 {GLO} market for APOS, U	191	km		61.2
	F10 Duela VG	Duela VG	2.3	ton	45%	629.8
	F11 Duela 5/8	Duela 5/8	1.12	ton	22%	306.6
	F12 Barrote luna VG	Barrote luna VG	1.73	ton	34%	474.4
Armado	F10. Duela VG	Duela VG	2.3	ton		629.8
	F11. Duela 5/8	Duela 5/8	1.12	ton		306.6
	F12. Barrote luna	Barrote luna VG	1.73	ton		474.4
	I14 Clavos rolados VG; I15 Clavos rolados 5/8	Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed APOS, U	0.08	ton		63.8
	E7.1 Montacargas	Gas LP (producción y combustión)	1.70E+03	MJ		132

	E6 Compresora	Electricity, medium voltage {MX} market for APOS, U	42.33	kWh		23.9
	F16. Tarima VG	Tarima VG	3.4	ton	64%	1050.0
	F17. Tarima 5/8	Tarima 5/8	1.88	ton	36%	580.5
Tratamiento térmico	F16. Tarimas VG	Tarima VG	3.4	ton		1050.0
	F17. Tarimas 5/8	Tarima 5/8	1.88	ton		580.5
	E8 Horno	Gas LP (producción y combustión)	3.07E+03	MJ		238
	F18. Tarimas VG terminada	Tarima VG terminada	3.4	ton	64%	1203.3
	F19. Tarima 5/8 terminada	Tarima 5/8 terminada	1.88	ton	36%	665.2
Transporte 3	F18. Tarimas VG terminada	Tarima VG terminada	3.4	ton		1203.3
		Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 {GLO} market for APOS, U	151	km		41.9
	F18. Tarimas VG terminada	Tarima VG terminada	3.4	ton	100%	1245.2

En las secciones consecuentes se describirán y analizarán los impactos de ACV llevados a la unidad funcional para la presente investigación, es decir, una tarima VG. En una producción por semana se generan un total de 270 tarimas.

4.4 Resultados de la evaluación de impacto.

En la Figura 29 se presenta una gráfica con once categorías de impacto, calculadas mediante el método de evaluación CML: 1) Agotamiento abiótico (AA), 2) Agotamiento abiótico (combustibles fósiles) (AGF), 3) Calentamiento global (CB 100a), 4) Agotamiento del ozono estratosférico (AOE), 5) Toxicidad humana (TH), 6) Ecotoxicidad acuática de agua dulce (ETAD), 7) Ecotoxicidad acuática marina

(EAM), 8) Ecotoxicidad terrestre (ET), 9) Formación de fotooxidantes (OF), 10) Acidificación (A) y 11) Eutrofización (E). Para su análisis los resultados de cada categoría de impacto, fueron normalizados a 100% (ver Figura 29) y se presentan para cada una de las etapas del sistema bajo estudio.

Seis categorías, tales como: agotamiento abiótico (combustibles fósiles), calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad terrestre, acidificación y eutrofización, presentaron resultados similares en lo que se refiera a la contribución a los impactos ambientales, donde, la etapa con mayor contribución en estas, con más del 50% de los impactos corresponden al transporte de madera en rollo (color naranja), seguida por la contribución de la etapa tratamiento térmico (color naranja traslucido).

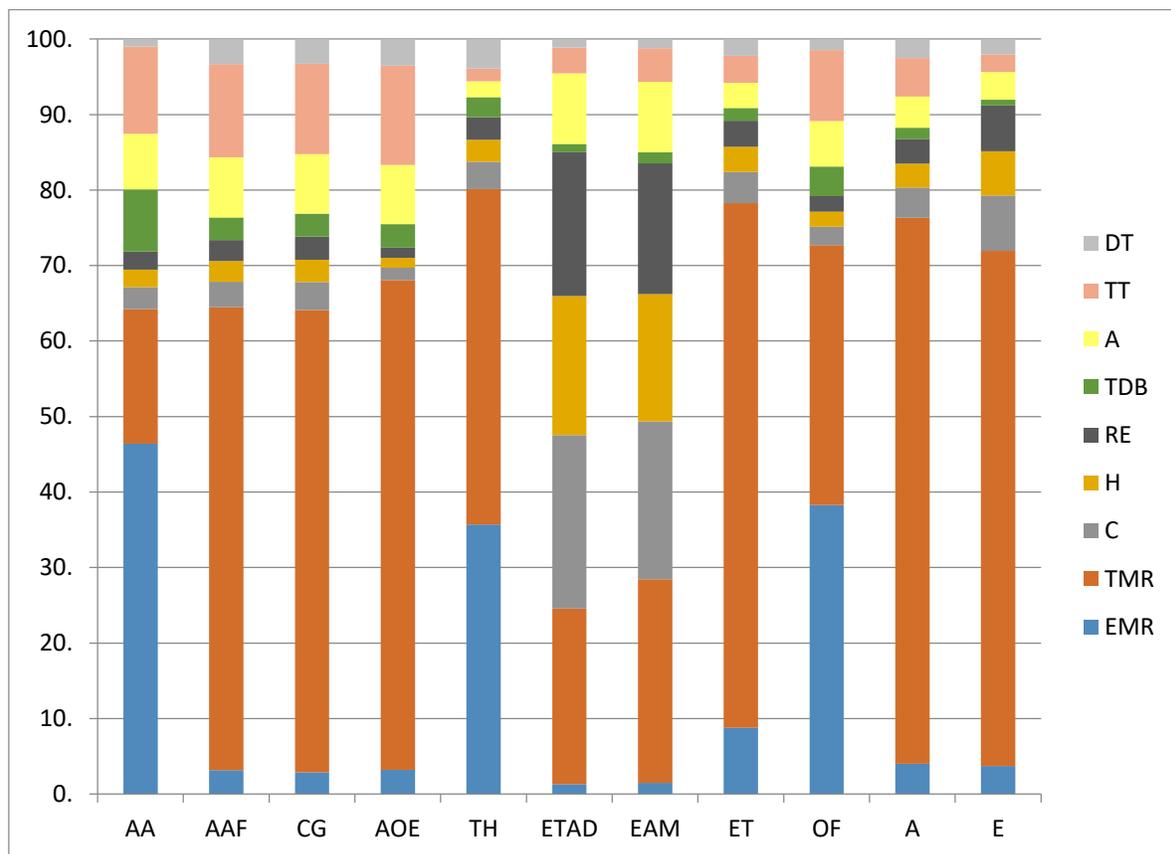


Figura 29. Impactos estimados por etapa de ciclo de vida. Etapas: Distribución Tarima (DT), Tratamiento Térmico (TT), Armado (A), Transporte Duela y Barrote luna (TDB), Recortado (RE), Hojeado (H), Cuarteado (CA), Transporte Madera en Rollo (TMR) y Extracción Madera en Rollo (ETR). (Elaboración propia).

En el caso de los impactos de toxicidad humana y oxidación fotoquímica, las etapas con mayores contribuciones fueron la “extracción madera en rollo” (color azul) y el “transporte madera rollo” (color naranja). Mientras que para el agotamiento abiótico la “extracción madera en rollo” (color azul) fue la etapa con mayor contribución. Además, para los impactos en ecotoxicidad acuática dulce y ecotoxicidad acuática

marina, las etapas de “Transporte madera en rollo” (color naranja), “cuarteado” (color verde), “hojeado” (color amarillo) y “recortado” (color gris oscuro) presentaron contribuciones semejantes.

Acorde con lo mencionado en el subtítulo 3.1.3.2 Impactos a evaluar, se optó por considerar e incluir todas las categorías de impacto de la metodología de CML, debido a que el sistema analizado y sus respectivas etapas y procesos presentaron una heterogeneidad de su distribución de impactos ambientales, observada en la contribución de las etapas de proceso con relación a las diferentes categorías de impacto (Figura 29), lo anterior principalmente vinculado al uso de algunos insumos como son combustibles fósiles, gas LP y electricidad. Sin embargo, entre las categorías de impacto ambiental se consideraron algunas podrían ser consideradas de mayor relevancia, tales como: agotamiento abiótico (combustibles fósiles) calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática de agua dulce, acidificación y eutrofización, éstas fuertemente asociadas a la influencia que el transporte de la madera en rollo en las actuales condiciones del proceso.

4.4.1 Calentamiento global (CG).

En la categoría, se estimaron las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de una tarima VG, con el cual, se obtuvo una huella de carbono de 4.72 kg CO_{2eq} / tarima (Figura 30). Resultado semejante al obtenido por Ruisheng et al. (2014), 4.009 kg CO_{2eq} / tarima. En su estudio, compara y calcula las emisiones emitidas en dos sistemas de producción de tarimas de madera hechas en Singapur: 1) tarimas con madera virgen y 2) tarimas con madera técnica. Siendo el primer sistema, muy parecido al del presente estudio, debido a que se trabaja con la madera virgen. En otro estudio hecho por Solano (2017), en el cual, se calculan las emisiones de una tarima de madera hecha en el Norte de Costa Rica, obteniendo 3.07 kg CO_{2eq} / tarima. En el trabajo realizado por Gajardo (2020), en donde calculan las emisiones de una tarima de madera hecha en Chile, obteniendo una huella de carbono de 3.51 kg CO_{2eq} / tarima.

Adicionalmente, en el estudio realizado por Niero et al. (2014), se analiza la producción de tarimas de madera producidas en Italia, estos autores no especifican cuantitativamente la huella de carbono que obtuvieron, pero si mencionan las etapas que más aporta a las emisiones de dióxido de carbono, siendo la etapa del transporte la que mayoritariamente emite kg CO_{2eq} para el impacto de calentamiento global. Resultados que también se obtuvieron en el presente estudio, en el de Ruisheng, en el de Gajardo y también en el de Solano.

Particularmente, en el trabajo de Ruisheng et al. (2014) se mostró que el transporte aportó 67.64 % de las emisiones. La diferencia, entre el resultado obtenido en este

estudio (58.93 %) y el mostrado por Ruisheng et al. (2014) (67.64 %) es únicamente del 8.71 %, esto puede deberse a las distancias que recorren la materia prima (madera) al sitio donde es procesada respectivamente.

Ruisheng et al. (2014), coincide también, que el tratamiento térmico (TT), obtiene el segundo puesto, principalmente por el uso de gas LP como combustible, en este estudio, esta etapa presenta 0.57 kg CO_{2eq} / tarima (12.68 %), asociado.

Por último, el Armado (A) con 0.37 kg CO_{2eq} / tarima (8.31 %) por el uso del montacargas y su respectivo consumo de gas LP. Entre estas tres etapas se encontraron el 79.92 % de la huella de carbono para este sistema.

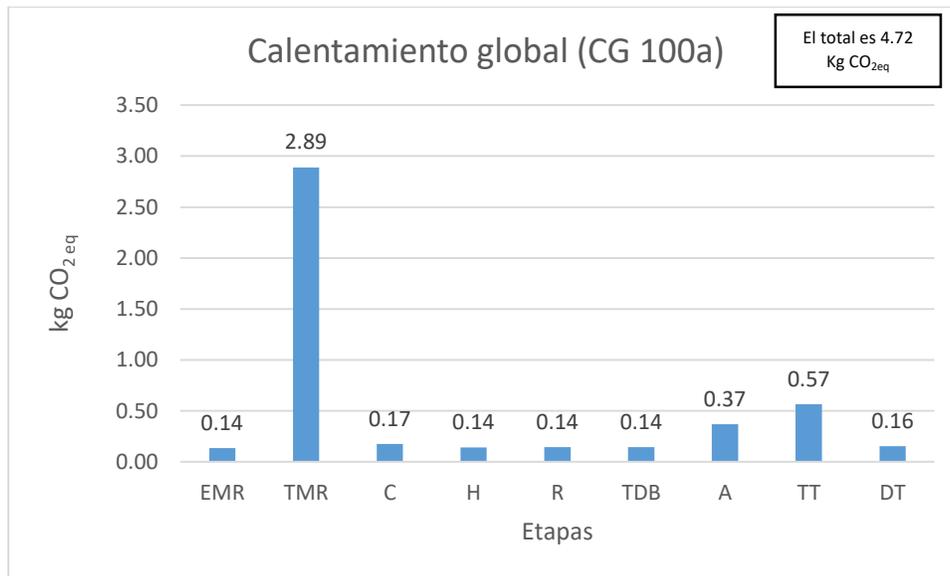


Figura 30. Impacto del potencial de calentamiento global por tarima VG producida. (Elaboración propia)

4.4.2 Agotamiento del ozono estratosférico (AOE).

Esta categoría, al igual que la anterior, tuvo su mayor contribución con relación a las etapas de transporte de madera en rollo (TMR) con 5.4E-07 kg CFC-11eq (62.64 %), el tratamiento térmico (TT) con 1.1E-07 kg CFC-11eq (14.00 %), y el armado con 6.5E-08 kg CFC-11eq (8.34 %). Entre estas tres etapas se encontraron el 84.98 % de la huella de agotamiento de la capa de ozono (Figura 31).

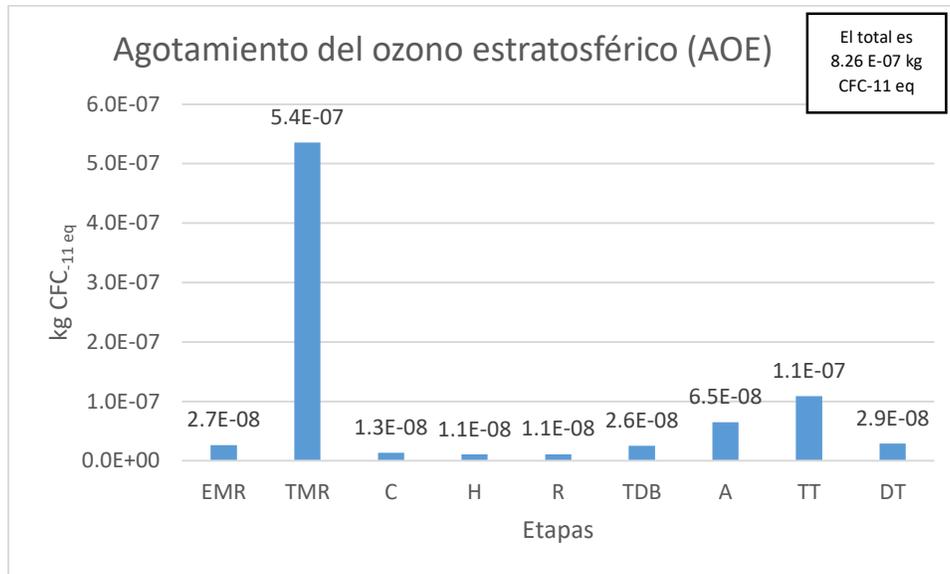
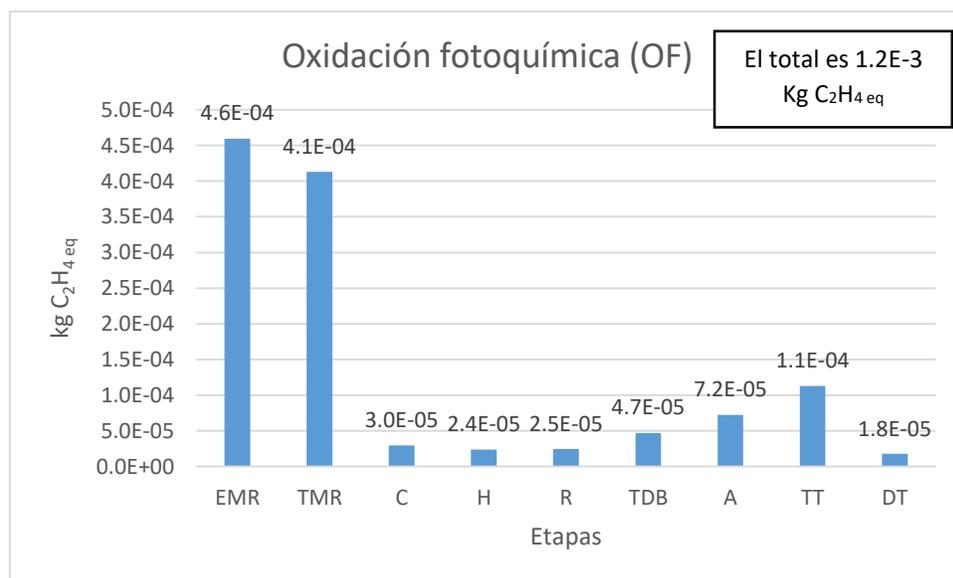


Figura 31. Impacto del potencial de agotamiento de ozono por tarima VG producida. (Elaboración propia)

4.4.3 Oxidación fotoquímica (OF).

A diferencia de las anteriores categorías, para la oxidación fotoquímica (OF), las etapas con mayor contribución de impactos fueron: la extracción de madera en rollo (EMR) con 4.6E-04 kg C₂H₄ eq (39.52 %) y el transporte de madera en rollo (TMR) con 4.1E-04 kg C₂H₄ eq (32.3 %), seguida de la etapa de tratamiento térmico (TT) con 1.1E-04 kg C₂H₄ eq (9.7 %), el armado (A) con 7.2E-05 kg C₂H₄ eq (6.22 %) y el transporte de duela y barrote luna (TDB) con kg C₂H₄ eq (4.04 %). Entre las cinco etapas se encontraron el 91.78 % de la huella de oxidación fotoquímica (Figura 32).



**Figura 32. Impacto del potencial de oxidación fotoquímica (OF) por tarima VG producida.
(Elaboración propia)**

4.4.4 Acidificación (A), Ecotoxicidad terrestre (ET), Eutrofización (E) y Agotamiento abiótico (AA).

Para estos cuatro impactos, los resultados obtenidos por la producción de las tarimas VG presentaron un patrón muy similar, donde, la etapa transporte de la madera en rollo (TMR) representó la mayor contribución.

Para la acidificación (A) (Figura 33A), la etapa transporte de la madera en rollo (TMR) equivale a $1.3E-02$ kg SO_{2 eq} (70.41 %), las demás etapas presentaron una mínima contribución en comparación a la antes mencionada. Las etapas subsecuentes son el tratamiento térmico (TT) con $9.3E-04$ kg SO_{2 eq} (5.47 %), el armado (A) con $7.5E-04$ kg SO_{2 eq} (4.42 %), la extracción de madera en rollo (EMR) con $7.3E-04$ kg SO_{2 eq} (4.28 %), y el cuarteado (C) con $7.2E-04$ kg SO_{2 eq} (4.24 %).

Para la categoría de agotamiento abiótico (fósil) (AAF) (Figura 33B), la etapa transporte madera en rollo (TMR) equivale a 41.6 MJ (59.07 %), mientras que las etapas subsecuentes fueron: tratamiento térmico (TT) con 8.4 MJ (13.08 %) y armado (A) con 5.4 MJ (8.43%).

Para la categoría de eutrofización (E) (Figura 33C), la etapa “transporte de la madera en rollo” (TMR) equivale a $2.8E-03$ (66.15 %), las etapas subsecuentes con mayor contribución fueron: “Cuarteado” (C) equivale a $3.0E-04$ (7.79 %), “hojeado” (H) equivale a $2.4E-04$ (6.26 %) y “recortado” (R) equivale a $2.5E-04$ (6.46 %).

El impacto de ecotoxicidad terrestre (ET) (Figura 33D), la etapa transporte de la madera en rollo (TMR) equivale a $1.8E-03$ kg 1,4-DB_{eq} (67.43 %), las etapas subsecuentes con mayor contribución fueron: extracción madera en rollo (EXT) con $2.2E-04$ kg 1,4-DB_{eq} (9.36 %), Cuarteado (C) con $1.1E-04$ kg 1,4-DB_{eq} (4.53) %, tratamiento térmico (TT) con $9.1E-04$ kg 1,4-DB_{eq} (3.8 %) y recortado (R) con $8.8E-04$ kg 1,4-DB_{eq} (3.67 %).

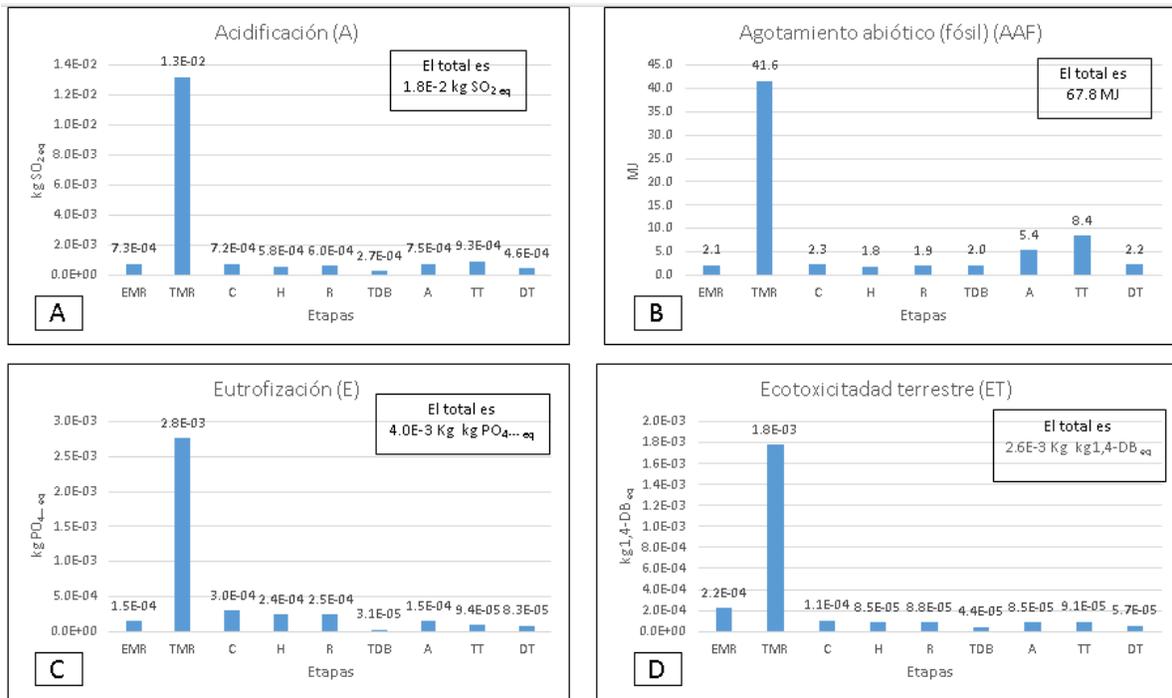


Figura 33. Impacto del potencial de: Acidificación (A) letra A, Ecotoxicidad terrestre (ET) letra B, Eutrofización (E) letra C y Agotamiento abiótico (fósil) (AAF) letra D, por tarima VG producida.

4.4.5 Toxicidad humana (TH).

Para este impacto, las etapas con mayor contribución fueron: transporte de madera en rollo (TMR) con 0.53 kg 1,4-DB_{eq} (42.09 %) y la extracción madera en rollo (EMR) con 0.43 kg 1,4-DB_{eq} (37.22 %). Entre las dos etapas se encontraron el 79.31 % de la huella de toxicidad humana (TH) (Figura 34).

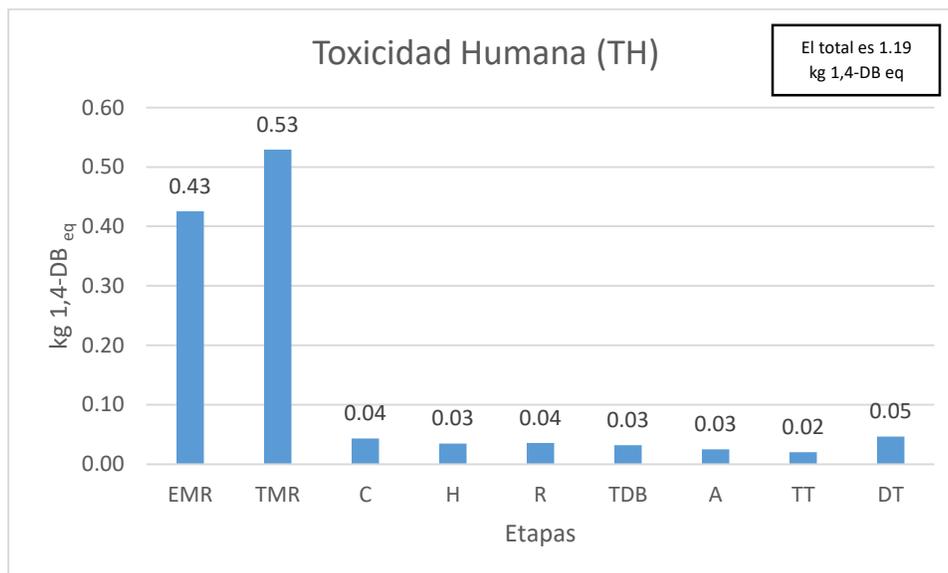


Figura 34. Impacto del potencial de toxicidad humana (TH) por tarima VG producida. (Elaboración propia)

4.4.6 Agotamiento abiótico (AA).

Para este impacto, las etapas con mayor contribución fueron: la extracción de madera en rollo (EMR) con 2.1E-08 kg Sb eq (47.18 %), transporte madera en rollo (TMR) con 7.9E-09 kg Sb eq (16.48 %), subsecuentemente el tratamiento térmico (TT) con 5.1E-09 kg Sb eq (11.74 %), transporte duela y barrote luna (TD) con 3.6E-09 kg Sb eq (8.37%) y armado (A) con 3.3E-09 kg Sb eq (7.48%). Entre las cinco etapas se encontraron el 91.25 % de la huella de agotamiento abiótico (AA) (Figura 35).

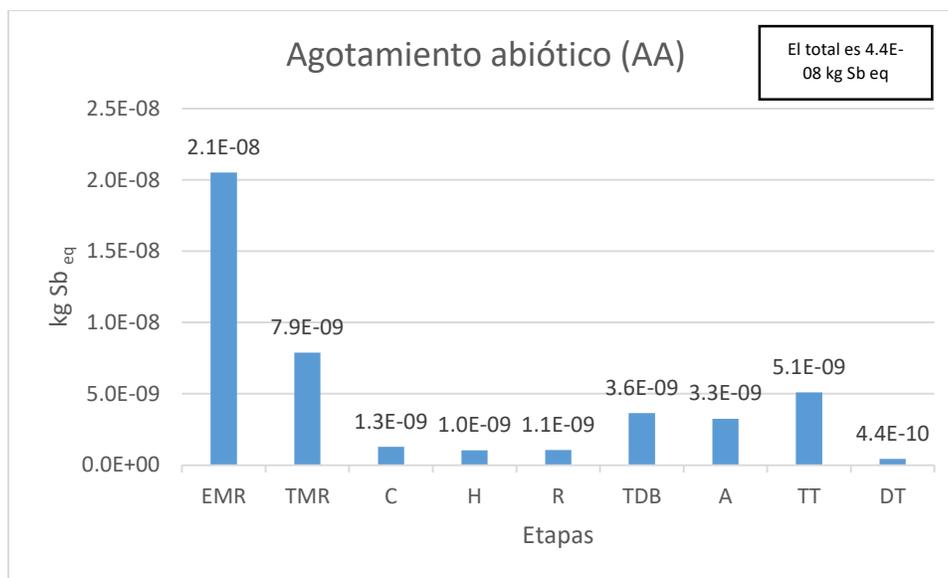


Figura 35. Impacto del potencial de agotamiento abiótico (AA) por tarima VG producida. (Elaboración propia)

4.4.7 Ecotoxicidad acuática de agua dulce (ETAD) y Ecotoxicidad acuática marina (EAM).

Para estos dos impactos, los resultados obtenidos fueron muy similares. En el impacto de ecotoxicidad de agua acuática dulce (ETAD) (Figura 36A). Las etapas con mayor contribución para este impacto fueron el transporte madera en rollo (TMR) con 0.048 kg 1,4-DB_{eq} (23.3 %), el cuarteado (C) con 0.047 kg 1,4-DB_{eq} (22.9 %), recortado (R) con 0.039 kg 1,4-DB_{eq} (19 %), hojeado (H) con 0.038 kg 1,4-DB_{eq} (18.4 %) y armado (A) con 0.019 kg 1,4-DB_{eq} (9.3 %), siendo estos los mayores contribuyentes. Entre las cinco etapas se encontraron el 93 % de la huella de ecotoxicidad acuática de agua dulce (ETAD).

En el impacto de ecotoxicidad acuática marina (EAM) (Figura 36B). Las etapas con mayor contribución fueron: transporte madera en rollo (TMR) con 184.4 kg 1,4-DB_{eq}

(25.1 %), cuarteado (C) con 143.3 kg 1,4-DB_{eq} (21.46 %), recortado (R) con 118.8 kg 1,4-DB_{eq} (17.78 %), hojeado (H) con 115.3 kg 1,4-DB_{eq} (17.25%) y armado (A) con 63.6 kg 1,4-DB_{eq} (9.53 %). Entre las cinco etapas se encontraron el 91.12 % de la huella de ecotoxicidad acuática marina (EAM).

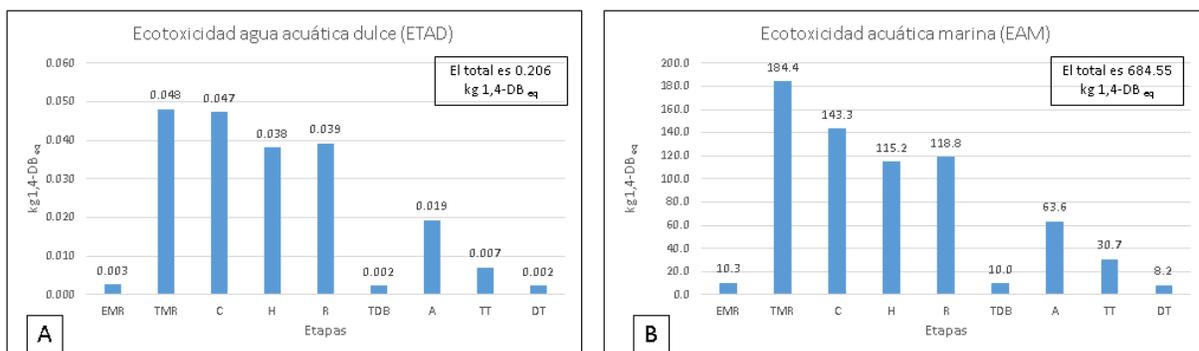


Figura 36. Impacto del potencial de: Ecotoxicidad de agua acuática dulce (ETAD) letra A y Ecotoxicidad acuática marina (EAM) letra B, por tarima VG producida. (Elaboración propia).

4.5 Interpretación

En esta sección se abordan dos principales tópicos, las limitantes en la obtención de datos y la identificación de hotspot y recomendaciones.

4.5.1 Limitantes en la obtención de datos

Como se mencionó previamente, durante las visitas no fue posible medir directamente la electricidad en cada sierra empleada en la empresa y en la bomba de aire, por lo que los datos que se asignaron para estas máquinas fueron calculados por equivalencias, mediante datos de consumo eléctrico aportados por el dueño de la empresa (por ejemplo, los tiempos de operación hora). Tampoco se cuantificaron las emisiones directas (perfiles de emisiones) en la quema de combustible fósil (gasolina, diésel y gas LP), en cambio fueron empleados datos secundarios de bases de datos como Ecoinvent, sin embargo, esta práctica es la más común en este tipo de estudios.

En el estudio, no se incorporó el reciclaje de las tarimas, ni su fin de vida, principalmente por motivos como complicaciones con la escala espacial y los recursos limitados para llevar a cabo una investigación de esa magnitud. Debido a que las tarimas son vendidas para exportación, hacer un seguimiento de las tarimas hasta su fin de vida resultó inviable. Adicionalmente, los datos obtenidos en la etapa de extracción no correspondieron a datos primarios, debido a la dificultad de hacer una visita al aserradero ubicado en el estado de Jalisco, sin embargo, estos datos

fueron tomados de la literatura, específicamente del trabajo de tesis de Mitzi Adriana Contreras Gallegos (2018) realizado para un aserradero en dicho estado.

4.5.2 Identificación de hotspot y recomendaciones.

En este sistema estudiado, se identificó como principal hotspot al transporte, la distancia entre el sitio de extracción, hacia el sitio de corte de la madera en rollo es uno de las principales fuentes de contaminantes. Para disminuir los impactos se sugiere reducir la distancia de éste primer transporte, como lo sugiere Ruisheng et al. (2014), la forma de reducirlo sería comprando la madera en rollo en sitios más cercanos de dónde es procesada. En el estado de Michoacán, hay municipios que se destacan por su producción en madera, como por ejemplo Nuevo Parangaricutiro o Tancítaro, el primero se encuentra a 114 km de la empresa de estudio (30 km menos donde se compra la madera) y la segunda se encuentra a 97.9 km (46.1 km menos de donde se compra la madera), esta reducción en la distancia del transporte, reflejaría para la empresa un ahorro económico por cada km que se evite recorrer. Otras medidas que se podrían tomar son: la adquisición de camionetas más eficientes en el ahorro de combustible o hacer uso de un combustible más limpio, como biodiesel.

Otro Hotspot identificado fue el consumo de electricidad. Actualmente existen varias formas de uso de energía alternativa, en este caso presentamos algunas sugerencias para disminuir las emisiones.

- Elaborar un diagnóstico de eficiencia energética.

El objetivo de un diagnóstico de eficiencia energética es la identificación de oportunidades de ahorro en las instalaciones. Consta de tres fases: 1) Levantamiento de datos, 2) Contabilidad energética y 3) Identificación y cálculo de medidas de mejora.

La ventaja en usar el diagnóstico de eficiencia energética es que una vez terminado, los datos obtenidos dan un panorama completo sobre cada uno de las actividades o instalaciones que utilizan energía eléctrica e incluso gas LP, facilitando la toma de decisiones con el objetivo de hacer un consumo energético eficiente (Energos, 2021). Para realizar un diagnóstico de eficiencia energética, es necesario contactar a una empresa especializada en esto, un ejemplo es la empresa Energos o céntrica Business Solutions.

- Mejoramiento de sierras.

Las máquinas (en este caso sierras), pueden tener cierta ineficiencia en el uso de la energía, algunas causas son:

- Conexiones defectuosas, cableados desgarrados o subdimensionados.
- Desbalanceo, desalineación, desajuste o resonancia de componentes mecánicos, generando fricción mecánica.
- La utilización de un lubricante con viscosidad incorrecta.

Arreglar o mejorar el estado de las máquinas influirá en la eficiencia del consumo energético, disminuyendo así, el gasto (\$), como las emisiones (CO_{2eq}) (tecnología para la industria, 2020).

- Mejoramiento del tratamiento térmico

También fue identificado como un hotspot, para este proceso, se recomienda revisar el estado del horno, de acuerdo a Vargas (2016), los hornos de cámaras constan por lo general de: cámara de secado, sistema de aireación, calefacción, humidificación, deshumidificación y sistema de control automático, si hubiera alguna falla, el resultado será un mayor consumo de combustible.

Otra opción para el tratamiento térmico es construir un secador solar para madera. El estudio de Garita et al. (2008), explica cómo elaborarlo, así como los materiales que pueden usarse para hacer el aislamiento térmico y otros detalles específicos a tomar en cuenta para la cantidad de madera que se desee secar. En contrata parte, por riesgo a que no quede bien, y por eso no se tome como opción viable, otra opción es contactar a alguna empresa que ya vendan este tipo secadores, como por ejemplo la empresa altertec.

Otra sugerencia que Vargas da en su estudio, es garantizar un buen aislamiento térmico del horno en puertas o estructuras para una adecuada hermeticidad; pintar las paredes de colores que absorban el calor, éste proceso de acuerdo a su estudio reduce un 8% la pérdida de calor.

4.5.3 Conclusión

Este trabajo de investigación proporciona nuevos conocimientos de ACV en el proceso de elaboración de Tarimas, en un caso de estudio del aserradero Vicar S.A. de C.V en el municipio de Zamora, Michoacán.

Se encontraron muy pocos estudios de ACV orientados a la producción de una tarima, además, la mayor parte de estos, sólo analizan la huella de carbono en el

ciclo de vida de la tarima, enfocándose así, en una sola categoría de impacto ambiental. Por tal motivo, en diez de once categorías presentadas en este estudio, no fue posible hacer una deseable comparación con otros resultados antecedentes.

La evidencia que presentamos demuestra que, haber realizado la toma de datos tan exhaustivamente, facilita determinar los hotspot y encontrar así, alternativas factibles para disminuir las emisiones del proceso de producción.

Las categorías de impacto como: agotamiento abiótico (combustibles fósiles) calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática de agua dulce, acidificación y eutrofización, son categorías de impacto donde influyó fuertemente el transporte, por lo que, al enfocar esfuerzos en alternativas de mejora al transporte, se podría influir en una disminución de varios de los impactos ambientales.

Será recomendable la obtención de datos primarios en la etapa de Extracción Madera en Rollo (EMR), debido a que esta etapa, presenta una contribución muy importante en las categorías de agotamiento abiótico (AA), toxicidad humana (TH), y oxidación fotoquímica (OF). Con los cuales, contar con datos más precisos para el análisis y al mismo tiempo, proponer sugerencias que mejoren la eficiencia de extracción de madera.

Anexo 1

Encuesta durante la primera visita.

1. ¿Podría describir el proceso de producción de las tarimas?
2. ¿Producen varios tipos de tarimas?
3. ¿Cuántas tarimas se producen en una semana?
4. ¿Cuánta madera compran a la semana?
5. ¿Cuántos días trabajan?
6. ¿Cuántas horas a la semana se trabaja?
7. ¿Qué tipo de vehículo o vehículos utilizan, y en que procesos los emplean?
8. ¿Qué combustibles utilizan?
9. ¿Cuántas horas se emplean los o, el vehículo?
10. ¿Tienen algún proceso térmico? Si lo tienen ¿qué combustible utilizan?

Referencias

Acero, A. P., Rodriguez, C., & Ciroth, A. Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories, LCIA Methods, 2017.

- Aguirre-Villegas, H. A., Milani, F. X., Kraatz, S., & Reinemann, D. J. (2012). Life cycle impact assessment and allocation methods development for cheese and whey processing. *Transactions of the ASABE*, 55(2), 613-627.
- Alanya-Rosenbaum, S., Bergman, R., & Gething, B. (2018). Developing procedures and guidance for performing an environmental assessment of US wooden pallets. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 215, 37-45.
- Alfranca, O. (2009). Regulación ambiental e innovación. *Cim. economía*, 15, 33-50.
- Anil, S. K., Ray, C. D., & Kremer, G. E. O. (2010). Comparison of treatment methods for pallets using LCA and dynamic programming. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- Ardente, F., & Cellura, M. (2012). Economic allocation in life cycle assessment: the state of the art and discussion of examples. *Journal of Industrial Ecology*, 16(3), 387-398.
- Ávila-Zárraga, J. G. (2009). Síntesis fotoquímica mediante luz solar. *Educación química*, 20(4), 426-432.
- Balcorta, C. C., & Arenas, R. G. (2010). Eutrofización: abundancia que mata.
- Bhattacharjya, J., & Kleine-Moellhoff, P. (2013). Environmental concerns in the design and management of pallets. In *Working Conference on Virtual Enterprises* (pp. 569-576). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bhattacharjya, J., & Walters, D. (2012). A global perspective on pallet life-cycle management practices and a research agenda.
- Bilbao, M. A., Carrano, A. L., Thorn, B. K., & Hewitt, M. R. (2011). Environmental impact analysis of pallets management. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- Birdsey, R. A. (1992). Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems. Gen. Tech. Rep. WO-59. Washington DC: US Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office. 51p., 59.
- Brickman, L., Coulon, R., Nehring, R., Matthews, R., McMullen, C., Noble, D., ... & Whittle, L. (1998, May). Life cycle assessment of a business telephone. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1998 (Cat. No. 98CH36145)* (pp. 255-259). IEEE.
- Buehlmann, U., Bumgardner, M., & Fluharty, T. (2009). Ban on landfilling of wooden pallets in North Carolina: an assessment of recycling and industry capacity. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 271-275.

Bracho, L. R., & Bravo, V. G. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo?. *Gaceta ecológica*, (69), 29-44.

Bravo, H., Roy-Ocotla, G., Sánchez, P., & Torres, R. (1992). Contaminación atmosférica por ozono en la zona metropolitana de la ciudad de México: evolución histórica y perspectivas. *IX Comisión Nacional de los Derechos Humanos*.

Carrano, A. L., Pazour, J. A., Roy, D., & Thorn, B. K. (2015). Selection of pallet management strategies based on carbon emissions impact. *International Journal of Production Economics*, 164, 258-270.

Castillo-Briceño, P., & Navarrete-Mierb, F. (2015). Potenciales Impactos de la Acidificación de los Océanos para las Pesquerías y Acuicultura Marina en Ecuador. *TILAPIA & CAMARONES Sociedad Latinoamericana de Acuicultura*, 7(24), 28-33.

CIPF. (2017). Reemplazo o reducción del uso de bromuro de metilo como medida fitosanitaria. Abril 12, 2020, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Sitio web: https://www.ippc.int/static/media/files/publication/es/2017/08/R_03_Es_2017-08-24_Combined.pdf

Consorcio, C. U. E. (2012). Capítulo II: Estudio ACV–Impacto Ambiental.

Contreras, M. (2018). *Análisis de los impactos ambientales del aprovechamiento de residuos como biocombustibles sólidos: estudio de caso de una empresa forestal en Jalisco* (tesis de pregrado). Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Michoacán, México.

Coria, I. D. (2008). El estudio de impacto ambiental: características y metodologías. *Invenio*, 11(20), 125-135.

Cortés, M. (2019). El Análisis de Ciclo de vida y sus principales softwares como herramientas de cálculo. diciembre 25, 2019, de Revista digital INESEM Sitio web: <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-sus-principales-softwares-como-herramientas-de-calculo/>

Chapela, G. (2012). Problemas y oportunidades en el mercado para las empresas sociales forestales en México. *Proyecto Competitividad de las Empresas Sociales Forestales en México. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, AC Universidad Autónoma Chapingo. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). México, DF, México*.

de Dios, D., Maribel, F., & Peña Salmón, C. Á. (2011). Identificación de perfiles ambientales en la Pyme a través de la auditoría ambiental. *Contaduría y administración*, (235), 195-215.

Diagnóstico de energía para identificación de proyectos de ahorro. (2019). enero 30, 2021, de Enero Sitio web: <https://www.grupoenergus.com/diagnostico-energetico>

ecoRaee. (2013). Informe de resultados del ACV del proceso. abril 21, 2021, de UniversidadeVrigo Sitio web: <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf>

Eficiencia en el consumo de energía de máquinas industriales: Acciones para alcanzar ahorros en tu planta. (2020). Enero 30, 2021, de TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA Sitio web: <https://tecnologiaparalaindustria.com/eficiencia-en-el-consumo-de-energia-de-maquinas-industriales-acciones-para-alcanzar-ahorros-en-tu-planta/>

EPA. (2001). La disminución de la capa de ozono. abril 21, 2021, de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos Sitio web: <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/ozono.pdf>

Estévez. (2016). El Análisis de Ciclo de Vida y su marco normativo. mayo 13, 2021, de eco inteligencia Sitio web: <https://www.ecointeligencia.com/2016/05/acv-marco-normativo/>

FAO. (2013). Reglamentación del embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. Abril 12, 2020, de Convención Internacional de Protección Fitosanitaria Sitio web: <http://www.fao.org/3/a-mb160s.pdf>

Flores-Velázquez, R., Serrano-Gálvez, E., Palacio-Muñoz, V. H., & Chapela, G. (2007). Análisis de la industria de la madera aserrada en México. *Madera y bosques*, 13(1), 47-59.

García, A., & Fernández, Ó. (1998). La contaminación y la pequeña industria en México. *comercio exterior*, 48.

Garita, C. S., Roque, R. M., & Foglia, R. C. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(14), 30-55.

García-Durañona, L., Farreny, R., Navarro, P., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Life cycle assessment of a coniferous wood supply chain for pallet production in Catalonia, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 137, 178-188.

García Miranda, F. G., & Miranda Rosales, V. (2018). EUTROFIZACIÓN, UNA AMENAZA PARA EL RECURSO HÍDRICO.

Garraín, D., Herrera, I., Lago, C., Lechón, Y., & Sáez, R. (2010). Asignación energética de los consumos de energía y emisiones de productos petrolíferos en refinería en el marco del ACV.

Gobierno Vasco. (2017). *Guía metodológica para la aplicación de la huella ambiental corporativa*. Octubre 08, 2021, de Departamento de desarrollo económico e infraestructura y departamento de medio ambiente, planificación territorial y vivienda Sitio web: https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/huella_ambiental/es_def/adjuntos/Guia_huella_ambiental_CASTdef.pdf

Gnoni, M. G., Tornese, F., Thorn, B. K., Carrano, A. L., & Pazour, J. (2018). A measurement tool for circular economy practices: a case study in pallet supply chains.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008. *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1*, 1-126.

Hauschild, M. Z., & Huijbregts, M. A. (2015). Introducing life cycle impact assessment. In *Life cycle impact assessment* (pp. 1-16). Springer, Dordrecht.

Heijungs, R., & Guineév, J. B. (2012). An overview of the life cycle assessment method-past, present, and future. In *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products* (pp. 15-41). John Wiley and Sons.

Hekkert, M. P., Gielen, D. J., Worrell, E., & Turkenburg, W. C. (2001). Wrapping Up Greenhouse Gas Emissions An Assessment of GHG Emission Reduction Related to Efficient Packaging Use: An Assessment of GHG Emission Reduction Related to Efficient Packaging Use. *Journal of Industrial Ecology*, 5(1), 55-75.

Homero, D & Gasca, J. (2007). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Junio 03, 2020, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Sitio web: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html>

INEGI. (2021). Buscador. Marzo 23, 2021, de INEGI Sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=Aserraderos#tabMCcollapse-Indicadores>

Inforural. (2017). Región Zamora principal productora de fresa del país. Agosto 20. 2019, de Información rural Sitio web: <https://www.inforural.com.mx/region-zamora-principal-productora-de-fresa-del-pais/>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Junio 03, 2020, de GOBIERNO DE MEXICO Sitio web: [https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-](https://www.gob.mx/inecc/acciones-y)

programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero

ISO. (2006). *ISO 14040:2006(es)*. noviembre 2, 2019, de Online Browsing Platform (OBP) Sitio web: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

JRC-IES, E. C. (2010). *ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment*.

ISTAS. (2010). *Compuestos orgánicos volátiles (COV)*. abril 21, 2021, de Gobierno de España Sitio web: <https://risctox.istas.net/index.asp?idpagina=621>

ISO. (2013). *ISO 445:2013(en) Pallets for materials handling*. septiembre 1, 2021, de Organización Internacional de Normalización Sitio web: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:445:ed-4:v1:en>

Kočí, V. (2019). Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets. *Science of The Total Environment*, 686, 514-528.

Kim, T. H., & Chae, C. U. (2016). Environmental impact analysis of acidification and eutrophication due to emissions from the production of concrete. *Sustainability*, 8(6), 578.

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. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 556-575.

Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*. John Wiley & Sons.

Leiva, E. H. (2016). Análisis de ciclo de vida. *Escuela de Organización Industrial*, 1-43.

López, C., Ghul, E. & Echeverri R.. (1995). El Agotamiento de la capa de ozono. abril 21, 2021, de ma (ministerio DEL MEDIO AMBIENTE) Sitio web: <https://www.guao.org/sites/default/files/biblioteca/EI%20agotamiento%20de%20la%20capa%20de%20ozono.pdf>

MacDicken, K., Jonsson, Ö., Piña, L., Maulo, S., Contessa, V., Adikari, Y., ... & D'Annunzio, R. (2016). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: cómo están cambiando los bosques del mundo?.m³

McKeever, D. B., McCurdy, D. R., Kung, F. H., & Ewers, J. T. (1986). Wood used in pallets manufactured in the United States, 1982. (*Resource bulletin FPL; 17*): 13 p., 17.

Margni, M., & Curran, M. A. (2012). Life cycle impact assessment. *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*, 67-104.

mdec. (2020). ¿Cuál es la diferencia entre muebles laminados y chapados?. Mayo 05, 2021, de madera de profesionales Sitio web: <https://www.emedec.com/diferencia-entre-muebles-laminados-y-chapados/>

MECALUX LOGISMARKET. (2018). *Medidas de pallets: ¿Cuáles son los estándares más extendidos?*. Noviembre 7, 2019, de MECALUX, S.A. Sitio web: <https://www.logismarket.es/blog/medidas-palets-estandares-extendidos/>

Menoufi, K. A. I. (2011). Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: a state of the art.

Molina-Murillo, S. A., Smith, T. M., Reichenbach, M., & Smith, R. (2005). Impact of international phytosanitary standards on wood packaging material end users: Pre-implementation assessment. *Forest products journal*, 55(9).

Naves, P., Inácio, M. L., Nóbrega, F., Sousa, E., & Michielsen, M. (2019). Pinewood nematode presence and survival in commercial pallets of different ages. *European journal of wood and wood products*, 77(2), 301-309.

Ng, R., Shi, C. W. P., Tan, H. X., & Song, B. (2014). Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: an assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *Journal of Cleaner Production*, 65, 447-457.

Niembro García, I. J., & González Benítez, M. M. (2008, July). Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva. In *XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos* (pp. 1180-1190).

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.

Olvera, O. (2013). ISO-14042. Mayo 13, 2021, de Prezi Sitio web: https://prezi.com/7_hkjr0qa0oi/iso-14042/

Peña, S. V. & Rojas, I. M. (2006). *Tecnología de la madera*. Mundi-Prensa Libros.

PNUMA. (2006). Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Abril 12, 2020, de Secretaría del Ozono Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Sitio web: <https://www.zapopan.gob.mx/wp-content/uploads/2015/03/Manual-del-Protocolo-de-Montreal-realtivo-a-las-sustancias-que-agotan-la-Capa-de-Ozono.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). Protocolo de Montreal. Abril 12, 2020, de ONU Sitio web:

<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development/environment-and-natural-capital/montreal-protocol.html>

PRTR España (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes). (2021). COMPUESTOS ORGÁNICOS HALOGENADOS (AOX). abril 21, 2021, de GOBIERNO DE ESPAÑA Sitio web: <http://www.prtr-es.es/Compuestos-Organicos-Halogenados-AOX,15627,11,2007.html#:~:text=Son%20sustancias%20qu%C3%ADmicas%20org%C3%A1nicas%20que,formados%20con%20bromo%20e%20Yodo.>

OECD. (2019). *OECD SME and Entrepreneurship Outlook 2019*. noviembre 1, 2019, de Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos Sitio web: https://www.oecd.org/industry/smes/Policy_highlights_SME_Final.pdfkkk

Olmos X. (s.f.). Guía para la recolección de datos necesarios para el cálculo de la huella ambiental del café. abril 23, 2021, de CEPAL Sitio web: https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/presentacion_18.10.17_ximena_olmos.pdf

ONU. (s.f.). Introducción a la Producción más Limpia. enero 28, 2020, de ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL Sitio web: https://www.unido.org/sites/default/files/2008-06/1-Textbook_0.pdf

Ramirez Mosquera, A., & Duque Rivera, J. (2009). Uso de metodología de evaluación ambiental de ciclo de vida.

Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín iE*, 91-97.

Rosenbaum, R. K. (2017). Selection of Impact Categories, Category Indicators and Characterization Models in Goal and Scope Definition. In *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment* (pp. 63-122). Springer, Dordrecht.

Real Academia de Ingeniería. (2020). Emisión biogénica. enero 28, 2020, Sitio web: <http://diccionario.raing.es/es/lema/emisi%C3%B3n-biog%C3%A9nica>

Rodríguez Pérez, M. (2019). Cálculo del potencial de agotamiento abiótico. Aplicación a la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar.

Ruisheng, Ng., Shi, C. W. P., Tan, H. X., & Song, B. (2014). Avoided impact quantification from recycling of wood waste in Singapore: an assessment of pallet made from technical wood versus virgin softwood. *Journal of Cleaner Production*, 65, 447-457.

Ruiz Amador, D., & Zúñiga López, I. (2012). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono.

SAGARPA. (2017). Fresa Mexicana. junio 26, 2019, de Planeación agrícola nacional 2017-2030 Sitio web: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257075/Potencial-Fresa.pdf>

Sanes Orrego, A. (2012). El análisis de ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenible: propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos. *Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)*.

Sanhueza, E., & Lissi, E. A. (2017). Aspectos cinéticos de la formación del smog fotoquímico.

Santos, H. C. M., Maranduba, H. L., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2017). Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3470-3482.

SEMARNAT. (2021). Anuario estadístico de la producción forestal 2018. México: Dirección general de gestión forestal y de suelos.

SEMARNAT. (2017). Catálogo de Productos Forestales Certificados. marzo 23, 2021, de CONAFOR Sitio web: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213032/Catalogo de Productos Forestales Certificados.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213032/Catalogo_de_Productos_Forestales_Certificados.pdf)

SEMARNAT. (2020). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Abril 18, 2020, de Gobierno de México Sitio web: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE02_06&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

Serra, L. M., Carvalho, M., & Lozano, M. (2011). Asignación de cargas ambientales en sistemas simples de trigeneración operando en condiciones variables. VII Congreso Nacional de ingeniería termodinámica.

Shahzad, U. (2015). Global Warming: Causes, Effects and Solutions. *Renewable energy*, 1(4), 7.

Shahidi, S. S. M. (2011). *Comparison of the potential environmental impacts of microwave phytosanitary treatment of wooden pallets to conventional heat and methyl bromide treatments* (Doctoral dissertation, Pennsylvania State University).

SimaPro. (2011). Diciembre 25, 2019, de CADIS Sitio web: <https://www.simapro.mx/>

SIREM. (2015). Perspectivas Sectoriales de la Industria de la Madera y el Papel. marzo 23, 2021, de CONAFOR Sitio web: <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/SIREM/Perspectiva%20Sector%20Forestal/2015/2015%20Octubre%20perspectiva.pdf>

Solano Salmerón, J. (2017). Impacto potencial sobre el cambio climático de las tarimas de madera elaboradas en la Región Huetar Norte de Costa Rica a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Stranddorf, H. K., Hoffmann, L., & Schmidt, A. (2005). LCA technical report: impact categories, normalization and weighting in LCA. Update on selected EDIP97-data. *FORCE Technology–Dk–TEKNIK. Dinamarca: Serietitel, 2003a. Disponible en:* http://www.lcacenter.dk/lcacenter_docs/showdoc.asp.

TIMCON—Timber Packaging and Pallet Confederation (2017). *Pallets and packaging, design and features*. Septiembre, 20, 2019 <http://www.timcon.org/Publicaciones/Factsheets/Download/Fact%20Sheet%20Design.pdf>.

Van Riet, C., Wijnendaele, K., & Varga, E. (2004). Utilización Sostenible de la Madera para la Fabricación de Productos y Obtención de Energía: ¿Conflicto u Oportunidad?. *CIS madera: Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera*, (12), 53-61.

Wu, H., Amin, S. H., & Karaphillis, G. Investigating the Forward and Reverse Supply Chains of Plastic Pallets in Canada.

Zamora-Torres, A. I., & Riveros-Figueroa, E. (2016). Estudio de la región Michoacana de Zamora como polo de competitividad internacional agrícola. *Clío América*, 10(20), 139-159.