

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Elaboración de una Declaración Ambiental de Producto para un Tablame Premium
de Maderas Cultivadas de Costa Rica”**

Paola Cerdas Ramírez

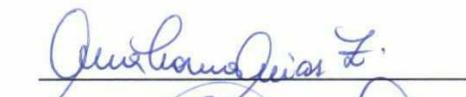
CARTAGO, junio, 2018.

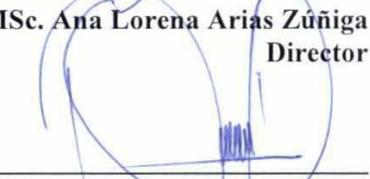
TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

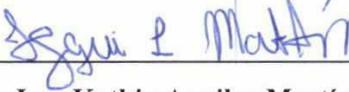
“Elaboración de una Declaración Ambiental de Producto para un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

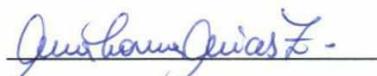

MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Director


PhD. Roberto Quiros Vargas
Lector 1


Ing. Kathia Aguilar Martín
Lector 2


MSc. Diana Zambrano Piamba
Coordinador COTRAFIG


PhD. Floria Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química


MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mi familia, Eli, Carlos y Simón, por ser mi definición de amor incondicional, todo mi amor y agradecimiento para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Maderas Cultivadas de Costa Rica por abrirme las puertas de su empresa y permitirme realizar mi trabajo final de graduación.

A Eddy Corrales por siempre ayudarme de manera tan atenta, la culminación de este trabajo es gracias a su apoyo.

A Geovanny López por darme la oportunidad de realizar este trabajo en MCC.

A Norman Mejías por su paciencia, amabilidad y disposición a ayudarme con la recolección de información y atender todas mis dudas.

A la profe Ana por guiarme en el proceso y siempre atender todas mis dudas de manera tan cordial. Muchas gracias por siempre motivarme a salir adelante e inspirarme una gran vocación hacia la ingeniería ambiental.

A Roberto Quirós por mostrar gran interés en la realización de este trabajo y ayudarme en todas las dudas del proceso.

A Elemer Briceño y Eric Romero por atender mis dudas técnicas de manera tan servicial.

A Tutio por aventurarse a ir hasta Santa Rosa de Pocosal conmigo a las visitas a la industria. Muchas gracias por ser siempre un ejemplo de persona amorosa y servicial.

A María Paz Lobo por siempre ayudarme y reunirse para ver todas mis dudas y sacar los resultados.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS	4
2.1.1 Objetivo General.....	4
2.2.1.2 Objetivos Específicos	4
3 REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA FORESTAL	5
3.1.1 Cobertura forestal global	5
3.1.2 Impactos ambientales asociados a la industria forestal	6
3.1.3 Sector forestal en Costa Rica.....	7
3.2 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	9
3.2.1 Definición	9
3.2.2 Fases del Análisis de Ciclo de Vida	10
3.2.3 Análisis de Ciclo de Vida en madera.....	11
3.3 TRAYECTORIA DEL USO DE MADERA EN CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE	14
3.4 GENERALIDADES DEL ECO-ETIQUETADO AMBIENTAL.....	16
3.4.1 Definición	16
3.4.2 Tipos de Eco-etiquetado	17
3.4.3 Trayectoria del eco-etiquetado en la industria forestal.....	17
3.5 GENERALIDADES DE LAS DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO.....	19
3.5.1 Definición	19

3.5.2 Regla de Categoría de Producto	20
4 METODOLOGÍA.....	21
4.1 ELABORACIÓN DE LA DAP	21
4.1.1 Identificación de la RCP	21
4.1.2 Elaboración de una DAP a través de un ACV.....	21
4.1.3 Tratamiento de carbono biogénico	33
4.2 FIJACIÓN DE CARBONO EN EL PRODUCTO TERMINADO	34
4.3 IDENTIFICACIÓN DE RETOS PARA EL ECO-ETIQUETADO EN EL SECTOR FORESTAL.....	34
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 SELECCIÓN DE LA REGLA DE CATEGORÍA DE PRODUCTO	35
5.2.1 Producción de Plántulas	36
5.2.2 Finca	39
5.2.3 Procesamiento de madera	46
5.2.4 Transporte del tablamel premium a punto de venta	50
5.2.5 Distribución del impacto ambiental en las etapas del ciclo de vida	51
5.3 COMPARACIÓN DEL ACV REALIZADO CON OTROS ACV PARA PRODUCTOS DE MADERA.....	58
5.3.1 Comparación con el ACV para tablero DM en Brasil.....	58
5.3.2 Comparación con otras DAP para productos de madera.....	61
5.4 FIJACIÓN DE CARBONO EN EL PRODUCTO FINAL	64
5.5 IDENTIFICACIÓN DE RETOS PARA EL DESARROLLO DE UNA DAP EN EL SECTOR FORESTAL.....	65
6 CONCLUSIONES	68
7 RECOMENDACIONES	70
8 REFERENCIAS	72

APÉNDICES	81
Apéndice 1: Datos de insumos de Maderas Cultivadas de Costa Rica	82
Apéndice 2: Cálculo de la huella de carbono de los fertilizantes	101
Apéndice 3: Cálculo de la electricidad en el procesamiento de madera	101
Apéndice 4: Cálculo de la energía producida por el aserrín.....	102
Apéndice 5: Características de los insumos según etapas del proceso.....	103
Apéndice 6: Bases de datos utilizados para representar los datos en simapro 8.2.3	112
ANEXOS	117
Anexo 1: Datos de precipitación total diaria para la estación metereológica Betania, Cutris para el año 2016.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Fases del Análisis del Ciclo de Vida	10
Figura 4-1. Límites del sistema para el ACV del Tablame Premium de MCC.....	23
Figura 5-1. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de producción de plántulas.	37
Figura 5-2. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de finca.	40
Figura 5-3. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de procesamiento de madera	57
Figura 5-4. Evaluación del potencial impacto ambiental de un tablame premium de MCC	61
Figura 5-5. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de cambio climático	62
Figura 5-6. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de acidificación	63
Figura 5-7. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de eutrofización	64
Figura 5-8 Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	65

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3-1. Distribución del área cobertura forestal y producción, remoción de madera y cambio en el área de bosque por regiones del mundo.	5
Cuadro 3-2. Impactos Ambientales del sector forestal analizados en diversos ACV.	7
Cuadro 3-3. Superficie y área de cobertura por tipo de bosque en Costa Rica para el año 2016	8
Cuadro 3-4. Potencial de mitigación de emisiones de GEI por uso de productos de madera	15
Cuadro 3-5. Sistemas de certificación forestal, área y porcentaje de bosque certificado y sus respectivas certificaciones de cadena de valor.	19
Cuadro 4-1. Datos de área total de plantación y distancia de las fincas para el periodo de plantación 2016.	25
Cuadro 4-2. Fuente de datos por etapa del ciclo de vida del Tablamel Premium.	28
Cuadro 4-3. Fuentes de información de los procesos corriente arriba	30
Cuadro 4-4. Fuentes de información de los procesos de la corriente central.	31
Cuadro 4-5. Fuentes de información de los procesos de la corriente abajo.	31
Cuadro 4-6. Categorías de impacto ambiental evaluados por el método Recipe MidPoint (H).	32
Cuadro 4-7. Categorías de impacto ambiental evaluadas por el método CED.....	32
Cuadro 4-8. Datos requeridos para el cálculo del contenido de CO ₂ fijado en el producto terminado	34
Cuadro 5-1. Datos iniciales necesarios para la conversión de la información en términos de una unidad de Tablamel Premium.	35
Cuadro 5-2. Resultados de la DAP para la producción de un Tablamel Premium en MCC.	56
Cuadro 5-3. Datos iniciales requeridos para la transformación de datos	59
Cuadro 5-4.. Comparación de resultados entre ambos estudios según la categoría de impacto ambiental	59
Cuadro 5-5. Resultados de la DAP para 1 m ³ de Tablamel Premium de MCC.	62
Cuadro 5-6. Comparación por aporte de etapa al potencial impacto ambiental con otros ACV de productos de madera.	63

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A	Acidificación
AA	Agotamiento de Agua
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AF	Agotamiento de Fuentes Fósiles
AM	Agotamiento de Recursos Minerales
AO	Agotamiento del Ozono
CED	Cummulative Energy Demand (Demanda Cumulativa de Energía)
CoC	Chain of Custody (Cadena de Custodia)
DAP	Declaración Ambiental de Producto
DM	Densidad Media
EIVC	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida
EM	Eutrofización Marina
EPI	Emulsión Polímero Isocianato
ETA	Ecotoxicidad de Agua Dulce
ET	Ecotoxicidad Terrestre
EA	Eutrofización de Agua Dulce
FAO	Food and Agriculture Organization for the United Nations
FOF	Formación de Oxidantes Fotoquímicos
FONAFIFO	Fondo de Financiamiento Forestal de Costa Rica
FSC	Forest Stewarship Council (Consejo de Administración Forestal)
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change (Panel Intergubernamental de Cambio Climático)
ISO	International Standards Organization (Organización de Estándares Internacionales)

JAPDEVA	Junta de Administración Portuaria y de Desarrollo Económico de la Vertiente Atlántica
JAS	Japanese Agriculture Standard (Norma de Agricultura Japonesa)
LEED	Leadership in Energy & Environmental Design (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental)
LPG	Liquified Petroleum Gas (Gas Licuado de Petróleo)
MCC	Maderas Cultivadas de Costa Rica
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
OA	Ocupación de Suelos Agrícola
OFS	Ordenación Forestal Sostenible
ONF	Oficina Nacional Forestal
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification (Programa para el Estímulo de la Certificación Forestal)
PNDF	Plan Nacional de Desarrollo Forestal
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PPSA	Programa de Pago por Servicios Ambientales
PVA	Polyvinyl Alcohol (Acetato de Polivinilo)
RCP	Regla de Categoría de Producto
SFI	Sustainable Forestry Initiative (Iniciativa Forestal Sostenible)
TH	Toxicidad Humana
UE	Unión Europea

LISTA DE SÍMBOLOS

1,4 DB	1,4 diclorobenceno
cc	Centímetro cúbico
CFC-11	Tricolofluorometano
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
eq	Equivalente
Fe	Hierro
ha	Hectárea
g	Gramo
gal	Galón
HP	Caballo de fuerza
K	Kelvin
kg	Kilogramo
kg/m ³	Kilogramo entre metro cúbico (Densidad)
kJ	Kilojulio
kJ/m ³	Kilojulio entre metro cúbico (Poder calórico)
kJ/kg. K	Kilojulio entre kilogramo Kelvin (Capacidad calórica)
km	Kilometro
kWh	Kilowatt-hora
L	Litro
m ²	Metro cuadrado
m ² a	Metro cuadrado año
m ³	Metro cúbico
Mg ha ⁻¹	Mega-gramo entre hectárea
MJ	Mega-julios
ml	Mililitro
N	Nitrógeno
NH ₃	Amoniacó
NH ₄ NH ₃	Amonio

NH ₄ NO ₃	Nitrato de Amonio
NO ₂	Óxido de Nitrógeno
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
NMVOC	Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano
P	Fósforo
PM ₁₀	Material particulado de 10 μm o menos
PMT	Pulgada madera tica
p/p	peso/peso
p/v	peso/volumen
SO ₂	Dióxido de azufre
SO _x	Óxidos de azufre
Tg	Tera-gramo
ton	Tonelada
Tkm	Tonelada por kilómetro
Tm	Tonelada métrica
ton/m ³	Tonelada entre metro cúbico (densidad)

RESUMEN

La implementación de políticas para la mitigación del cambio climático promueve el uso de estrategias ambientales para la obtención de productos con mayor sostenibilidad. En el caso de la Unión Europea (UE), para el año 2020 se requiere que todos los productos exportados presenten una Declaración Ambiental de Producto (DAP). En Costa Rica, el 25,1% de la madera total producida es destinada al sector de la construcción y el 18,9% para exportación en bruto y aserrado, lo que implica que el país requiere del desarrollo de capacidades técnicas para la elaboración de DAP. Para la realización de la DAP, precedido por el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se utilizó la metodología estipulada en las normas ISO 14025, ISO 14040, ISO 14044 y la Regla de Categoría de Producto (RCP) para Productos de madera de uso estructural y arquitectónico para Norteamérica UN CPC 31-NAICS 321. El alcance definido para el ACV fue de la cuna a la puerta considerando las etapas del ciclo de vida de producción de plántulas, finca, procesamiento de madera y transporte al punto de venta en Río Segundo de Alajuela. Los resultados de la DAP para la producción de un Tablame Premium en Maderas Cultivadas de Costa Rica fueron de 10,6 kg CO₂ eq de potencial de cambio climático, 0,016 kg SO₂ eq de acidificación, 0,00082 kg N eq de eutrofización, 0,011 kg NMVOC de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, 5,33 E-07 kg CFC-11 eq agotamiento de la capa de ozono, 0,036 m³ de potencial de agotamiento de agua y un consumo total de energía primaria de 100,47 MJ. Se determinó que los insumos y procesos de mayor relevancia ambiental fueron el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, producción de calor para el secado, consumo eléctrico y el uso de diésel. La fijación de carbono en el producto terminado presentó un resultado de 41,76 kg CO₂ lo que permite una diferenciación en el mercado en contraste con materiales alternativos para la construcción. La comparación con otros estudios indicó que no existe similitud en el aporte del impacto ambiental por etapa del ciclo de vida, a excepción de la huella de carbono. El reto primordial identificado para la implementación del eco-etiquetado en el sector forestal fue la inexistencia de un mercado que solicite la demanda de productos de madera con certificados de calidad ambiental por lo que la viabilidad económica para la implementación es nula.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, Declaración Ambiental de Producto, Eco-etiquetado, Fijación de carbono, Tablame Premium, Regla de Categoría de Producto

ABSTRACT

The implementation of policies for the mitigation of climate change promotes the use of environmental strategies to obtain products with greater sustainability. In the case of the European Union (EU), by 2020 it is required that all exported products present an Environmental Product Declaration (EPD). In Costa Rica, 25,1% of total timber production is due to the construction sector and 18,9% to exportation of raw and sawed timber, which implies that the country requires the development of technical capacities for the preparation of EPD. For the elaboration of the EPD, a Life Cycle Analysis (LCA) was required, for which the methodology stipulated by ISO 14025, ISO 14040, ISO 14044 and the Product Category Rule (PCR) for products of wood for structural and architectural use for North America A CPC 31-NAICS 321 were followed. The scope defined for the LCA was from the cradle to the gate considering the life cycle stages of seedling production, forestry operations, wood processing and transportation to the point of sale. The results of the DAP to produce a Premium Wooden Panel in Maderas Cultivadas de Costa Rica were 10,6 kg CO₂ eq for climate change potential, 0,016 kg SO₂ eq for acidification, 0,00082 kg N eq for eutrophication, 0,011 kg NMVOC for potential of formation of photochemical oxidants, 5,33 E-07 kg CFC-11 eq for depletion of the ozone layer, 0,036 m³ for water depletion potential and a total primary energy consumption of 100,47 MJ. It was determined that the environmental hot spots were the intensive use of nitrogen fertilizers, the production of heat for drying process, electricity consumption and the use of diesel. The carbon fixation in the finished product showed a result of 41,76 kg CO₂ which allows a differentiation in the market in contrast with alternative materials for construction. The comparison with other studies indicated that there is no similarity in the impact of environmental impact per stage of the life cycle, except for the carbon footprint. The main challenge identified for the elaboration of eco-labels in the forestry sector was that there is no market that requests the demand for wood products with environmental quality certificates for which the economic feasibility for implementation is zero.

Key words: Life Cycle Analysis, Product Environmental Declaration, Eco-labeling, Carbon fixation, Premium Wooden Panel, Product Category Rule

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las problemáticas ambientales a escala mundial, primordialmente el cambio climático, ha generado en las últimas dos décadas el desarrollo de políticas ambientales y prácticas de eco innovación y ecoeficiencia (De Lucía, Balena, Stufano & Bori, 2016). A su vez, el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) destaca en su objetivo 12 la importancia de reducir la huella ecológica mediante el establecimiento de modalidades de consumo y producción responsables; para garantizar el desarrollo sostenible y el crecimiento económico (ONU, 2017). Considerando las normativas ambientales a nivel global, múltiples organizaciones y empresas han comenzado a invertir en el rediseño de sus productos y procesos con la finalidad de lograr una mayor sostenibilidad; mediante el uso eficiente de materias primas, agua y energía y la minimización de la generación de residuos y emisiones atmosféricas (Ramos *et al.*, 2018). La adopción de prácticas de producción más limpia es influenciada primordialmente por los consumidores que presentan tendencias hacia la compra de productos cada vez más sostenibles (Garza-Reyes, 2015).

En este marco de referencia, la industria de la construcción comenzó la aplicación de prácticas para el uso eficiente de recursos de materia prima y la disminución del consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de su ciclo de vida (Liu & Lin, 2016). El desarrollo de estas metodologías es consecuente a que la construcción de edificios es responsable del consumo del 40% de energía global total generada, 12-16% de agua disponible, 40% de extracción de recursos, 30-40% de producción de residuos sólidos y por último 35-40% de emisión de CO₂, valor que representa un tercio de las emisiones totales de GEI (Mastrucci *et al.*, 2017; Berardi, 2013). La implementación de estrategias para la construcción verde destaca la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la selección de tecnologías y materiales con el menor impacto ambiental potencial para la planeación y diseño de edificios (Malmqvist *et al.*, 2011).

Por lo tanto, se destaca el uso de madera en construcción debido a que genera un aporte significativo en cuanto a la eficiencia ambiental en un edificio. Los productos de madera constituyen un sumidero de carbono mediante el almacenamiento de CO₂ en su biomasa; además, de que requieren un menor consumo de energía para su producción en comparación

con otros insumos como el acero o cemento (Martínez & Berdasco, 2015). El uso de productos madera en construcción presenta un potencial de mitigación del sector forestal en términos de cambio climático ya que puede afectar el balance de carbono; a través de los mecanismos de reducción del consumo de combustibles fósiles en la fase de producción en contraste con materiales alternativos, evitar las emisiones del procesamiento de cemento y la fijación de carbono en el producto final (Geng, Yang, Cheng & Hong, 2017). En Costa Rica, la construcción sostenible es impulsada por sistemas de certificación como el Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED, por sus siglas en inglés) y se promueve el uso de madera en el Programa País Carbono Neutralidad (MINAE, 2017).

Por su parte, las tendencias de aprovechamiento del recurso forestal en Costa Rica para el año 2016 registraron un uso total de 965.815 m³ de madera en troza. La mayor fuente de producción representa la modalidad de plantación forestal con un porcentaje del 77% del volumen descrito (Estado de la Nación, 2017). Los principales usos de la madera en el año 2016 se clasifican en 46,7% correspondiente a la fabricación de tarimas, 25,1% en el sector de construcción, 18,9% en exportación en bruto y aserrado, 9% en la elaboración de muebles y por último 0,3% en otros usos. Con respecto a la industria de la construcción, se realiza una transformación primaria de un volumen de 242.174 m³ de madera de los cuales un 45% se destina a la producción de reglas, cuadros de madera, alfajilla y similares, 33,7% para la manufactura de formaleta, 12,1% de artesanado para uso estructural y 9,2% para elaboración de molduras. El cultivo de madera como actividad forestal en el año 2016 generó un total de 14.576 empleos directos principalmente en las zonas rurales; de los cuales corresponden al sector primario (actividades de aserrío y regencia) un total de 5.115. El secundario, fábricas de molduras, muebles y tarimas, produjo un total de 4.222 empleos. El valor agregado del uso de madera superó los \$235 millones donde el 34% corresponde a empleo. Los sectores primario y secundario generaron más de \$131 millones de valor agregado, el sector de la construcción más de \$65 millones y finalmente el comercio de madera más de \$23 millones (Oficina Nacional Forestal, 2017).

Adicionalmente, la Unión Europea (UE) creó un conjunto de políticas como parte de su plan sobre clima y energía para el año 2020 para incentivar el crecimiento sostenible, inteligente e integrador (Bel & Joseph, 2018). Los requerimientos del mercado UE solicitan la

exportación de productos con estándares de desempeño ambiental para el año 2020, por consiguiente, el desarrollo de informes de ACV para la validación de la calidad ambiental. En el país no existen instituciones con la capacidad de realizar ACV y DAP debido a que la aplicación de estas herramientas es de carácter incipiente. La finalidad de este proyecto es elaborar una DAP en un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica para determinar los impactos ambientales más significativos basado en la norma ISO 14025:2007 y la Regla de Categoría de Producto (RCP) correspondiente. Asimismo, crear una base en el proceso de investigación y viabilidad para el desarrollo de ACV en el país y la identificación de retos para la implementación del eco-etiquetado en el sector forestal.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo General

Elaborar una Declaración Ambiental de Producto (DAP) en un Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica (MCC).

2.1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una Declaración Ambiental de Producto basado en la norma INTE/ISO 14025:2007 y la Regla de Categoría de Producto específica.
- Determinar los principales impactos ambientales de la producción del Tablame Premium a través del análisis de resultados.
- Comparar el ciclo de vida del Tablame Premium de Maderas Cultivadas de Costa Rica con otros estudios de análisis de ciclo de vida realizados en productos de madera.
- Calcular la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) fijado en el producto terminado.
- Identificar los principales retos para la implementación del eco-etiquetado ambiental para el sector forestal en Costa Rica.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA FORESTAL

3.1.1 Cobertura forestal global

Los bosques representan la mayor fuente de recursos para el sustento humano debido a que proporcionan la captura de dióxido de carbono (CO₂), regulación de la temperatura, protección contra la erosión e inundaciones, almacenamiento de agua y hábitat para diversidad de especies de flora y fauna. Los bosques desempeñan un factor de relevancia en la mitigación del cambio climático por su capacidad de fijación de CO₂ almacenado en forma de madera, en adición, a constituir una fuente de bioenergía (Makkonen *et al.*, 2015). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) (2016), el área de cobertura forestal es de 4 mil millones de hectáreas, las cuales constituyen a un tercio de la superficie a nivel global. La distribución del área de bosque, producción y remoción de madera por región del mundo se describe en el Cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Distribución del área cobertura forestal y producción, remoción de madera y cambio en el área de bosque por regiones del mundo.

Adaptado de: FAO, 2016.

Región	Área de bosque (mill. ha)	Área de producción (mill. ha)	Total de remoción de madera (mil. m ³)	Cambio en el área de bosque (%)
África	624	165	614	-0,49
Asia	593	247	780	0,17
Europa	1.015	511	681	0,08
América del Norte y Central	751	124	513	-0,01
Oceanía	174	13	63	-0,08
América del Sur	842	127	346	-0,40
Global	3.999	1187	2997	-0,13

Cambio en el área de bosque: indicador que alude a cambios en la habilidad del bosque para proveer bienes de importancia global y servicios.

3.1.2 Impactos ambientales asociados a la industria forestal

La industria forestal comprende la cadena de valor compuesta por el manejo forestal, la producción de pulpa y papel, el procesamiento de madera, la gestión de residuos sólidos y por último el transporte (Makela, 2017). El manejo del recurso forestal constituye la primera etapa de la cadena de suministro de producción forestal. El impacto asociado a esta fase es dependiente del proceso de extracción de la materia prima, referente a la procedencia de la madera ya sea de bosques nativos o plantaciones forestales. La extracción de madera en bosques nativos, en comparación a las plantaciones forestales, requiere cinco veces más área de terreno de cultivo, un consumo de agua once veces mayor, el doble de la cantidad de combustibles fósiles y un requerimiento de 50% más de lubricante para el procesamiento de madera (May, England, Raison & Paul, 2012).

A su vez, los procesos comprendidos por el manejo del recurso forestal son la producción de plántulas, preparación del sitio, plantación, fertilización, control de malezas, cosecha y transporte. Las principales entradas al proceso son fertilizantes nitrogenados, plaguicidas, combustibles fósiles y agua. Por su parte, las salidas del sistema son emisiones atmosféricas, principalmente gases de efecto invernadero (GEI) y la generación de desechos sólidos (biomasa en la plantación). Los impactos ambientales asociados a dicha fase son consecuentes a la alta demanda de recursos naturales para la obtención de trozas de madera donde destacan uso de suelo intensivo para la plantación, agua y diésel para la preparación del terreno, cosecha y transporte de las trozas (Dias & Arroja, 2012). Asimismo, el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados constituye una fuente importante de emisiones de óxidos nitrosos (N_2O) posterior a su aplicación, el cual es un GEI con potencial de calentamiento global 265 veces mayor que el CO_2 . Por lo tanto, la fase de fertilización en plantaciones forestales produce un alto potencial de impacto en las categorías de cambio climático, acidificación y eutrofización (Roche *et al.*, 2016).

La etapa de procesamiento constituye la obtención de madera aserrada para la fabricación de productos como láminas, rollos y tableros de fibra y partículas para su uso en construcción o arquitectónico (elaboración de muebles). La industria forestal mecánica se caracteriza por el uso intensivo de energía y materia prima, consumo de combustibles fósiles así como adhesivos y resina de carácter eco-tóxico. Por lo tanto, el procesamiento de madera implica

la generación emisiones de CO₂, CH₄, NO_x y SO_x, gases contribuyentes al potencial de calentamiento global y acidificación (May *et al.*, 2012). Según Moro *et al.* (2017), los puntos de relevancia ambiental por su potencial impacto son el consumo de gas natural en la planta térmica, energía eléctrica para el procesamiento y la resina urea-formaldehído, la cual constituye el adhesivo más ampliamente utilizado en la industria. El consumo de la resina a base de formaldehído presenta un impacto significativo en las categorías de cambio climático, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad y toxicidad humana. Dichos impactos proceden a la emisión de formaldehído por la fabricación de la resina (reacción de condensación), la presencia de formaldehído residual en la resina y cuando el formaldehído se libera por degradación hidrolítica de la resina curada durante la producción de paneles de madera (Lopes, Pavan, de Oliveira & Ometto., 2015).

La aplicación de ACV permite identificar los principales impactos ambientales asociados a la industria forestal, los cuales se presentan en el Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2. Impactos Ambientales del sector forestal analizados en diversos ACV.
Fuente: Makela, 2017.

Referencia	Impacto Ambiental													
	CC	AO	TH	FOF	A	EU	EM	ET	EA	EM	AA	AF	OA	AM
Morales <i>et al.</i> (2015)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Silva <i>et al.</i> (2015)	x	x	x	x	x	x		x	x					
González <i>et al.</i> (2013)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cambria & Pierangeli (2012)	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		

Abreviaciones: CC: Cambio Climático, AO: Agotamiento del Ozono, TH: Toxicidad Humana, FOF: Formación de Oxidantes Fotoquímicos, A: Acidificación, EU: Eutrofización de Agua Dulce, EM: Eutrofización Marina, ET: Ecotoxicidad Terrestre, EA: Ecotoxicidad de Agua Dulce, EM: Ecotoxicidad Marina, AA: Agotamiento de Agua, AF: Agotamiento de Fuentes Fósiles, OA: Ocupación de Suelos Agrícolas, AM: Agotamiento de Recursos Minerales.

3.1.3 Sector forestal en Costa Rica

Los recursos forestales de Costa Rica están constituidos por una cobertura del 41%, bosques maduros, 32% bosques secundarios, 31,5% pastos arbolados, 2% plantaciones forestales y

1% de manglares y bosques de palmas respectivamente (Estado de la Nación, 2017). La distribución del área de cobertura se muestra en el Cuadro 3-3.

Cuadro 3-3. Superficie y área de cobertura por tipo de bosque en Costa Rica para el año 2016
Fuente: Estado de la Nación, 2017

Uso del suelo (tipo de suelo)	Superficie (km ²)	Superficie (ha)	Participación cobertura arbórea (%)	Participación total (%)
Bosque maduro	15.485,83	1.548.583,38	40,05	30,30
Bosque secundario	9.408,2	940.820,31	24,33	18,41
Rodales con mangle	362,50	36.250,34	0,94	0,71
Bosque de palmas	472,19	47.219,26	1,22	0,92
Pasto con árboles	12.194,26	1.219.425,65	31,54	1,46
Plantaciones forestales	745,97	74.596,85	1,93	51,79

Según el Programa REDD/CCAD-GIZ, el área de cobertura boscosa en el país constituye la fuente primordial de fijación de carbono para el cumplimiento de la meta de carbono neutralidad. La cobertura del 64% de bosques permite un almacenamiento de carbono de 639.872,83 ton CO₂ para el bosque secundario y 1.605.409,87 ton CO₂ para el bosque maduro (Estado de la Nación, 2017).

Por su parte, la tendencia del cultivo de madera mediante el uso de plantaciones forestales es decreciente debido a los altos costos de tierra, el costo de oportunidad de la tierra en actividades alternativas (tubérculos, piña), dificultad para lograr economías de escala, pérdida de oportunidad del servicio de pagos por servicios ambientales, entre otros (ONF, 2014). Se desarrolla problemática en el país debido al desabastecimiento progresivo de madera en el mercado nacional de manera que se requiere un aumento del nivel de importaciones. La tendencia decreciente es evidenciada para el año 2013, donde se produjo

300.00 m³ de madera menos con respecto al suministro nacional en el 2007. La adecuada elaboración y aplicación de planes de manejo forestal mediante la implementación de la Ordenación Forestal Sostenible (OFS) es de relevancia para asegurar el mantenimiento de los servicios ambientales de los bosques tropicales y a su vez la explotación racional de recursos para cumplir con la demanda nacional (FONAFIFO, 2014).

Por consiguiente, las políticas e iniciativas forestales se orientan a propiciar la reactivación económica para la producción, transformación y comercialización de productos forestales sostenibles y la generación de ingresos en la zona rural del país. Dichas iniciativas están descritas en el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF), en el cual se establecen los lineamientos para fortalecer las capacidades técnicas calificadas en pequeños y medianos productores, mejorar las condiciones de seguridad jurídica, desarrollar un sistema de trazabilidad y verificación de legalidad y por último fomentar el consumo de madera nacional de origen legal (Estado de la Nación, 2015).

Adicionalmente, en el sector de producción de madera para la construcción existe una ausencia de políticas que propicien la seguridad jurídica y el exceso de requisitos impiden el aumento de la cantidad de abastecimiento de madera proveniente del manejo sustentable de los bosques. Es así como la presión hacia los recursos forestales consecuente a la tala ilegal y manejo inadecuado implica una reducción significativa de las poblaciones naturales de las especies de madera cristóbal, cocobolo y caoba (Estado de la Nación, 2017).

3.2 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

3.2.1 Definición

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que estima los impactos ambientales potenciales de cualquier sistema, proceso o producto a lo largo de su ciclo de vida, la cual permite brindar información para la toma de decisiones implementando criterios de carácter ambiental (Vilches, García-Martínez & Sánchez, 2017). Según la norma ISO 14040 (2007), el ACV genera la recopilación y evaluación de todas las entradas y salidas de un sistema de producto en todo su ciclo de vida desde la adquisición de materia primera, pasando por la producción, utilización, tratamiento y disposición final; permitiendo la identificación de los impactos ambientales significativos.

El ACV es comúnmente utilizado para la orientación de políticas y programas ambientales, comunicación de información ambiental mediante el eco-etiquetado; además, genera un proceso de mejora continua en las industrias mediante la reducción de impactos ambientales y el diseño de productos más sostenibles (Levasseur *et al.*, 2016). Por lo tanto, el ACV representa la metodología más eficaz para evaluación de impactos ambientales de cualquier sistema o producto debido a que permite la obtención de indicadores para determinar el desempeño ambiental de un producto mediante la valoración integral de la totalidad de fases presentes (Angelakoglou & Gaidajis, 2015).

3.2.2 Fases del Análisis de Ciclo de Vida

La metodología para la aplicación del ACV se presenta estandarizada en las Normas ISO 14040: 2007 e ISO 14044: 2007, sus fases se describen en la Figura 3-1.

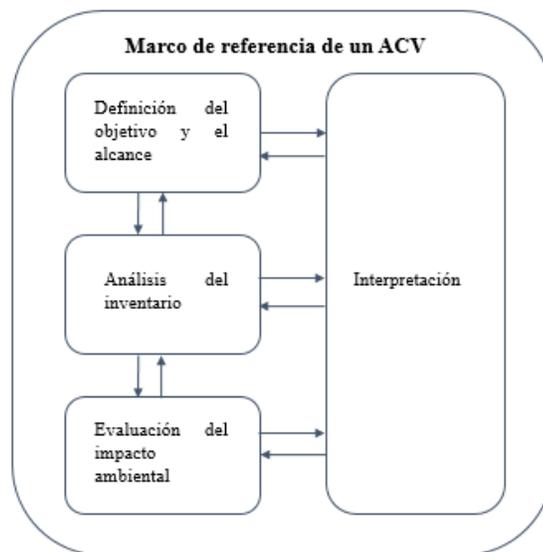


Figura 3-1. Fases del Análisis del Ciclo de Vida.
Fuente: ISO, 2007.

2.2.2.1 Definición de objetivos y de alcance

Según la norma ISO 14040 (2007), los objetivos del ACV deben establecer la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y el público meta. El alcance, por su parte, debe estar definido de manera tal que permita garantizar la amplitud y el nivel de detalle del estudio para el cumplimiento del objetivo determinado. El alcance requiere detallar el sistema de

estudio y sus respectivos límites, la unidad funcional, el flujo de referencia y las categorías de impacto ambiental. A su vez, la unidad funcional constituye un parámetro de referencia en el estudio a la cual las entradas y salidas del proceso están relacionadas por lo que representa la base para los cálculos del inventario. La definición de la unidad funcional es dependiente de los objetivos y la presentación de resultados requerida para la realización de un ACV (Kylili & Fokaides, 2016).

2.2.2.2 Análisis del Inventario de Ciclo de Vida

La norma ISO 14040 establece que en esta fase se desarrolla el inventario de los datos obtenidos para las entradas y salidas del sistema, la cual debe considerar las etapas del ciclo de vida, procesos unitarios y flujos de acuerdo con los límites del sistema establecidos. La recopilación de datos debe incluir las categorías de entradas de energía, materia prima y auxiliares, los productos, coproductos y las salidas como las emisiones al aire y vertidos al agua y suelo. La cuantificación de las entradas y salidas del proceso requiere de la validación de los datos recopilados, la relación de los datos con los procesos unitarios y la concordancia de estos con el flujo de referencia de la unidad funcional.

2.2.2.3 Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV)

El objetivo de esta fase es proveer de información adicional para la definición, comprensión y evaluación de la significancia ambiental de las entradas y salidas del estudio con base en las categorías de impacto seleccionadas (Tecco, Baudino, Girgenti & Peano, 2016).

2.2.2.4 Interpretación del Ciclo de Vida

La interpretación de ciclo de vida corresponde a la etapa final donde los resultados obtenidos son analizados para el desarrollo de conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones efectivas en relación con los objetivos y alcance definidos (Su, Li, Zhu & Lin 2017).

3.2.3 Análisis de Ciclo de Vida en madera

Se han realizado múltiples estudios de ACV para la producción de madera: Ferro *et al.* (2018), García & Freire (2014), Cambria & Pierangeli (2012), Kouchaki, Shariff, Mousazadeh & Zarea (2016), Moro *et al.* (2017), González-García *et al.* (2011), Iritani *et al.* (2015) y González-García (2012).

El estudio realizado por Ferro *et al.* (2018) para la identificación de aspectos ambientales en la producción de paneles de manera destacó que el procesamiento de madera es la etapa del ciclo de vida con mayor impacto ambiental. Dicha fase fue responsable del 90,5% del potencial de cambio climático, 50,5% del potencial de acidificación, 99,8% del potencial de eutrofización, 92,6% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, 77,1% del potencial de agotamiento de la capa de ozono y el 67,2% de la toxicidad humana. Las fuentes principales de impacto ambiental fueron la producción de electricidad, el uso de la resina de metil difenil disocianato, la generación de calor en la planta térmica y la fabricación del termocida para el tratamiento de la madera.

Según García & Freire (2014), el estudio para el cálculo de la huella de carbono de un tablero de partículas generó un resultado de -939 a 188 kg CO₂ eq/m³ para un alcance de cuna a la puerta, de 107 a 201 kg CO₂ eq/m³ para un alcance de la cuna a la tumba con fin de vida por incineración y por último un valor de -692 a 433 kg CO₂ eq/m³ para un alcance de la cuna a la tumba con relleno sanitario. Los valores de huella de carbono negativo corresponden a la inclusión del almacenamiento de carbono biogénico y los positivos a su exclusión. Dicho estudio utilizó cuatro metodologías diferentes para el cálculo (ISO 14067, GHG Protocol, PAS 2050, Climate Declaration) donde destaca que las principales diferencias son el tratamiento de carbono biogénico, exclusiones de proceso y multifuncionalidad.

El estudio de Cambria & Pierangeli (2012) presentó la finalidad de evaluar los impactos ambientales de una plantación de *Juglans regia L.* para la producción de madera de alta calidad. El ACV realizado indicó que las principales fuentes de impacto ambiental corresponden a la fase de labranza para la preparación del terreno y el uso de fertilizantes nitrogenados; respectivamente a través del consumo de diesel y una alta tasa de volatilización del NH₃. Las categorías de impacto de mayor significancia fueron la acidificación, eutrofización y el potencial de calentamiento global con contribución mayoritaria por las emisiones de amonio y la producción de fertilizantes.

Por su parte, el estudio de Kouchaki *et al.* (2016) para el ACV de un tablero de densidad media (DM) señaló que el subproceso con mayor impacto ambiental es la preparación de la fibra para la etapa de procesamiento de madera. La principal fuente de impacto ambiental fue el uso de resina de urea-formaldehído en las categorías de cambio climático, eutrofización,

ecotoxicidad (marina y terrestre) y agotamiento de los recursos abióticos. Por su parte, el consumo de electricidad y gas LPG en industria y el transporte constituyeron los factores ambientales de mayor relevancia en las categorías de acidificación, potencial de formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de la capa de ozono.

A su vez, el estudio de Moro *et al.* (2017) identificó que el consumo de gas natural en la planta térmica, la resina de urea-formaldehído, el uso de electricidad, el transporte de las trozas y el consumo de materia prima (madera) fueron los factores de mayor significancia ambiental. Por lo tanto, la fase del ciclo de vida de procesamiento de madera generó el mayor impacto ambiental. Adicionalmente, se destacó que al realizar acciones de eficiencia energética, eliminación del uso de gas natural en la planta térmica y la sustitución parcial o total de la resina permiten una reducción del 38,5% del agotamiento de la capa de ozono, 34,4% del agotamiento de recursos abióticos, 31,5% de la ecotoxicidad y un 30,4% de la toxicidad humana.

Por su parte el estudio de González-García *et al.* (2011) señaló que las cuatro etapas que influyeron de manera significativa en las cargas ambientales totales fueron el sistema de procesamiento, la producción de energía térmica, consumo eléctrico y finalmente la etapa de astillado de madera. El potencial de calentamiento global representó la huella ambiental de mayor relevancia del estudio con una contribución del 83% por la preparación de fibras por uso de químicos y resinas y consumo eléctrico (principalmente de fuentes fósiles) y el 17% por el requerimiento de diesel en la fase de aserradero de madera.

El estudio de Iritani *et al.* (2015) realizó un ACV para un closet de tableros de densidad media (DM). Los resultados de la evaluación del ciclo de vida indicaron que los impactos ambientales significativos provienen de las etapas de suministro de materia prima y la distribución del producto final. Las categorías de impacto más relevantes son la toxicidad humana, potencial de calentamiento global y acidificación, las cuales representan un 68% del total de los impactos del ciclo de vida.

Finalmente, el estudio de González-García *et al.* (2012) identificó que los procesos con mayor potencial de impacto ambiental fueron debidos a la producción de panel de madera y el consumo eléctrico con un aporte del 45-68% y 14-33% respectivamente dependiendo de la categoría de impacto ambiental para el ACV realizado en muebles de madera para niños.

Las categorías ambientales de potencial de calentamiento global, toxicidad humana y ecotoxicidad acuática presentaron los resultados mayoritarios de impacto ambiental para el estudio.

3.3 TRAYECTORIA DEL USO DE MADERA EN CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

El creciente aumento en la demanda de materiales de construcción ecológicos implica un impacto directo en la adopción de prácticas constructivas para la promoción de edificios “verdes”; término referente a un edificio que considera y minimiza su impacto ambiental y a la salud humana mediante la reducción significativa del uso de recursos (energía y agua), selección de materiales y mobiliario basado en su análisis de ciclo de vida y proporcionan una mejor calidad de aire interior (Darko, Zhang & Chan, 2017). Es así como los sistemas de clasificación de edificios ecológicos representan los estándares de desempeño ambiental a evaluar; los cuales incluyen directrices para la implementación de productos energéticamente eficientes, materiales sostenibles, prácticas de gestión ambiental en las construcciones, uso de materiales reciclados y calidad de aire interior (Espinoza, Buehlmann & Smith, 2012).

Los estándares para la construcción sostenible se enfocan en la reducción efectiva del impacto ambiental de la edificación nueva o existente mediante la implementación del análisis de ciclo de vida (Gou & Xie, 2017). Según Ahn, Pearce, Wang & Wang (2013), los principales beneficios del ecodiseño en edificios son la prevención del cambio climático por la disminución de las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, uso de recursos naturales renovables y mejora del crecimiento económico. Por consiguiente, los edificios con certificados de sostenibilidad permiten la reducción del 13,6% de costos de operación, 32% de reducción del uso de la electricidad y una disminución de 350 toneladas métricas (TM) de emisiones de CO₂ (Wu *et al.*, 2017).

Según Geng, Yang, Chen & Hong (2017), la utilización de la madera como material de construcción sostenible presenta un potencial de mitigación del cambio climático mediante el mecanismo de almacenamiento de carbono en biomasa. Las plantaciones forestales absorben CO₂ mediante el proceso de fotosíntesis y lo almacenan en su biomasa; por lo que los productos de madera constituyen un reservorio de CO₂ al contener parte del carbono fijado en finca. La reducción de emisiones por la sustitución por productos de madera hace referencia a la menor emisión por uso de combustibles fósiles para su producción en

comparación con la producción de materiales alternativos no madereros; dichas emisiones son primordialmente por procesos de adquisición y transporte de materias primas y el procesamiento del producto final (Smyth *et al.*, 2017). El potencial de reducción de emisiones mediante la sustitución de materiales no madereros de uso intensivo de energía por productos de madera se detalla en el Cuadro 3-4.

Cuadro 3-4. Potencial de mitigación de emisiones de GEI por uso de productos de madera
Adaptado de: Geng *et al.*, 2017.

Referencia	Efecto de la sustitución
Chen <i>et al.</i> (2014)	Un factor de sustitución del 2,4 en construcción para el periodo 1951-2010 para uso residencial es equivalente al 11% del total de las emisiones por combustibles fósiles en Canadá para el periodo de 1901-2010
Kayo <i>et al.</i> (2015)	El uso de productos de madera en Japón proyecta una reducción del 0,6-1,4 Tg C en el 2030 y del 1,3-2,9 Tg C en el año 2050
Nepal <i>et al.</i> (2016)	Se proyecta para un periodo de 50 años que el aumento en la demanda de productos de madera equivalente a 428 Tg CO ₂ eq utilizado en construcciones no residenciales proporciona una reducción de 870 millones de toneladas de CO ₂ en Estados Unidos (13% del total de emisiones nacionales para el 2013)

Asimismo, la madera constituye un material de construcción con bajo impacto ambiental mediante la comparación del desempeño a través de la implementación de ACV con otras materias primas para dicho sector, las cuales destacan hierro, cerámica, aluminio, PVC, concreto y cemento. Se estima por cada metro cuadrado de construcción se emiten 0,5 toneladas de CO₂ de los cuales un 1,5% corresponde a la manufactura de madera. Adicionalmente, se genera un consumo de energía total de 5.754 MJ donde se obtiene un porcentaje de 1,5% de contribución a la demanda energética para la industria de producción de madera (Kellenberger & Althaus, 2009). El potencial de reducción de emisiones es evidenciado en el estudio de Skullestad, Bonhne & Lohne (2016) donde para la categoría de impacto ambiental de cambio climático se obtuvo un resultado del 34-84% menor por el uso

de madera en comparación con el concreto reforzado para uso estructural, rango dependiente a las características del edificio y metodología implementada

A nivel de mercado en el sector constructivo, se presentan tasas de crecimiento constante del 2,5-15% en la demanda de la producción de madera en Europa, principalmente para la obtención tableros de fibra de densidad media (DM), tableros laminados y madera laminada. Paralelo a su crecimiento, se ha creado un valor agregado en el costo del producto consecuente al menor impacto ambiental por disminución de emisiones (Hildebrandt, Hagemann & Thran, 2017). Las tendencias de desarrollo que permiten una mayor demanda de productos de madera son el progreso técnico hacia construcciones de madera de alto rendimiento, progreso en la protección contra incendios y regulaciones ambientales y el crecimiento en la capacidad de producción de materiales de construcción ecológicos (Ostman, Brandon & Frantizh, 2017). El auge de la implementación de herramientas de gestión ambiental en la producción de materiales de construcción de carácter sostenible estima un incremento de \$166 mil millones a \$245 mil millones en el año 2020 (Lohmeng, Sudasna & Tondee, 2017).

Por su parte, las principales barreras para la promoción de madera en la construcción son la demanda en el mercado y políticas de construcción, donde se destaca la resistencia e incentivos insuficientes del sector al cambio de tecnología, falta de conocimiento de las aplicaciones de madera, falta de interés en la aplicación de medidas de sostenibilidad, baja inversión urbana (Najjar, Figueiredo, Palumbo & Haddad, 2017).

3.4 GENERALIDADES DEL ECO-ETIQUETADO AMBIENTAL

3.4.1 Definición

El eco-etiquetado representa una herramienta de gestión ambiental y mercadeo para proveer información a los consumidores acerca del desempeño ambiental de un producto a lo largo de las fases de extracción, producción, consumo y disposición final. El uso del eco-etiquetado presenta como objetivo la promoción del incremento de los estándares ambientales de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida en las empresas fabricantes y gobiernos (Chappin, Cambré, Vermeulen & Lozano, 2015). Los beneficios primordiales de la implementación del eco-etiquetado son el mejoramiento de carácter ambiental en la totalidad

de los procesos de producción y la apertura del mercado hacia un nuevo grupo de consumidores (Hojnik & Ruzzier, 2017).

3.4.2 Tipos de Eco-etiquetado

Según Wu, Xia, Pienaar & Zao (2014), se definen tres tipos de eco-etiquetado ambiental de acuerdo con las normas ISO:

- **Tipo I:** sistema voluntario de eco-etiquetado ambiental por verificación de terceros mediante el cumplimiento de un conjunto de criterios. La norma ISO 14024 define los principios y procedimientos para este tipo de eco-etiquetado.
- **Tipo II:** declaraciones medioambientales realizadas por los fabricantes y empresas bajo criterios de responsabilidad de cumplimiento de la información. Los lineamientos y procedimientos por cumplir se detallan en la norma ISO 14021
- **Tipo III:** se refiere a declaraciones ambientales certificados por entes de verificación que proporcionan un esquema de información del análisis de ciclo de vida de un producto. El marco referencial de requisitos de cumplimiento se presenta en la norma ISO 14025.

3.4.3 Trayectoria del eco-etiquetado en la industria forestal

Los sistemas de certificación forestal, los cuales aplican para el eco-etiquetado de madera, se definen como iniciativas con la finalidad de promover el uso sustentable de los bosques desde un marco referencial ambiental, económico y social (Cubbage, Diaz, Yapura & Dube, 2010). La creación de este tipo de certificaciones ambientales es consecuente a la necesidad de informar a los consumidores de la calidad ambiental de los productos forestales por la demanda de madera con validación de producción sostenible en el mercado. Estas certificaciones promueven una gestión ambiental del bosque para apoyar la prestación de servicios de ecosistemas forestales en los que se destacan la fijación de carbono, conservación de la biodiversidad, protección y captación del recurso hídrico, ecoturismo y mantenimiento de la fertilidad del suelo (Jaung, Putzel, Bull, Guariguata & Sumalia, 2016). El objetivo de este tipo de certificaciones es la identificación y comunicación del desempeño ambiental de la madera para cumplir con los requerimientos del mercado e influir en el comportamiento de compra de los consumidores (Galati *et al.*, 2017).

El aumento de la demanda en el mercado de productos de madera certificados constituye un factor relevante para el desarrollo de certificaciones de carácter forestal. De esta manera, el desarrollo del eco-etiquetado presenta la finalidad, por parte de los productores de madera, de generar un valor agregado a su producto, mejorar la capacidad del manejo forestal, mayor posicionamiento de la empresa en el mercado, cumplir con los objetivos de responsabilidad social y fomentar la producción más limpia. Por su parte, los consumidores compran productos de madera certificada para apoyar la conservación de la biodiversidad y reducir la deforestación ilegal (Jaung, Putzel, Bull, Kozak & Elliot, 2016).

En adición, los sistemas de certificación forestal están constituidos por tres componentes principales los cuales son una norma que describe los criterios de cumplimiento, un proceso de verificación y la certificación que garantiza la calidad ambiental del producto. Los estándares de certificación forestal se clasifican en 3 categorías, la primera se basa en la evaluación del rendimiento del recurso forestal valorado mediante el uso de indicadores de desempeño para las prácticas de producción. La segunda categoría de sistemas de certificación utiliza la adopción de procedimientos estandarizados definidos por el ente certificador, orientados a sistemas de gestión en el desarrollo y monitoreo de prácticas. Por último, la tercera categoría constituye una combinación de estándares tanto de rendimiento como de proceso (Espinoza *et al.*, 2012).

A su vez, la Certificación de Cadena de Custodia (CoC) se define como la trazabilidad de los productos forestales a lo largo de la cadena de valor (cosecha, transporte, procesamiento, distribución) y su respectiva transferencia de propietarios. La CoC es debida a que se genera un cambio de propietario en las diferentes etapas de producción de madera desde la plantación forestal hasta el consumidor final. Por consiguiente, se elabora un sistema de trazabilidad que permite asegurar la calidad ambiental del producto en la totalidad de la cadena de producción para validar el manejo sostenible de los bosques. De esta manera, las CoC presentan información verificable acerca del desempeño ambiental del producto final de madera a los potenciales consumidores (Chen & Innes, 2013).

Los sistemas de certificación forestal de mayor implementación para diversas especies de madera a nivel global para plantaciones forestales de manejo sostenible se presentan en el Cuadro 3-5.

Cuadro 3-5. Sistemas de certificación forestal, área y porcentaje de bosque certificado y sus respectivas certificaciones de cadena de valor.

Fuente: Espinoza *et al.*, 2012.

Sistema de Certificación	Área de bosque certificado (ha)	Porcentaje del bosque certificado en comparación al global (%)	Certificaciones de Cadena de Custodia (unidades)
Programme for the Endorsement and Forest Certification (PEFC)	234,6	5,8	8.248
Forest Stewardship Council (FSC)	134,8	3,3	19.760
Sustainable Forest Initiative (SFI)	78,0	2,6	996
American Tree Farm System	10,5	0,3	-

3.5 GENERALIDADES DE LAS DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO

3.5.1 Definición

Según la norma ISO 14025 (2006), la Declaración Ambiental de Producto (DAP) es un documento registrado y verificado el cual presenta la información ambiental cuantificada sobre el ciclo de vida de un producto para la comparación entre productos que cumplen la misma función en el mercado. Las DAP se basan en una verificación independiente de los datos del ACV, del análisis de inventario de ciclo de vida (ICV) o módulos de información en conformidad con la serie de normas ISO 14040 e ISO 14044.

La finalidad de las DAP es ayudar a los compradores a la realización de comparaciones de manera informada entre productos, promover la mejora del desempeño ambiental y por último propiciar información para evaluar los impactos ambientales de los productos a lo largo de su ciclo de vida.

3.5.2 Regla de Categoría de Producto

Las Reglas de Categoría de Producto (RCP) especifican las pautas necesarias para la estimación del impacto potencial de un producto para uno o más factores ambientales para la elaboración de una DAP. Las RCP proporcionan orientación acerca de la delimitación de las etapas del ciclo de vida del producto, la fuente de los datos a utilizar, la unidad de referencia para los cálculos y los factores de caracterización de impacto ambiental (Minkov, Schneider, Lehmann & Finkbeiner, 2015).

4 METODOLOGÍA

Se utilizaron tres procesos metodológicos para el presente trabajo, uno para la elaboración de la DAP, otro para el cálculo de la fijación de carbono en el producto terminado y por último para la identificación de retos en la aplicación del eco-etiquetado en el sector forestal en Costa Rica.

4.1 ELABORACIÓN DE LA DAP

La metodología utilizada se basó en los principios y requerimientos de las normas INTE/ISO 14025:2007 para Declaraciones Ambientales de Producto, la ISO 14040 y la ISO 14044 para Análisis de Ciclo de Vida.

4.1.1 Identificación de la RCP

Se utilizó la RCP para Productos de uso estructural y arquitectónico de madera para Norteamérica UN CPC 31-NAICS 321 para evaluar las categorías de impacto ambiental de cambio climático, potencial de acidificación, potencial de eutrofización marina, formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de la capa de ozono; en adición, del consumo total de energía primaria y el potencial de agotamiento del agua.

4.1.2 Elaboración de una DAP a través de un ACV

Para la realización del ACV se utilizó una combinación en la metodología de la RCP para Productos de uso estructural y arquitectónico de madera para Norteamérica UN CPC 31-NAICS 321 y las normas ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14025.

4.1.2.1 Especificaciones

4.1.2.1.1 Del Fabricante

Maderas Cultivadas de Costa Rica (MCC) es una empresa dedicada a la industrialización y comercialización de madera desde principios de 1980. Esta empresa surge como respuesta al uso racional y adecuado de los recursos forestales de Costa Rica. A partir del año 1990 se implementa un programa de mejoramiento genético para el posterior desarrollo de las primeras plantaciones clonadas en América en 1992. La empresa MCC cuenta con sistema integrado de gestión de calidad con la Norma JAS para el cumplimiento de calidad de la madera en términos de resistencia y envejecimiento. Además, la empresa cuenta con políticas ambientales para el cumplimiento de la legislación ambiental y forestal a nivel nacional e

internacional y la implementación del sistema de manejo sostenible para la reforestación. Las plantaciones forestales son principalmente de melina (*Gmelina arborea*) la cual es una especie que permite la regeneración de plantas autóctonas de la zona y ayuda a formar corredores biológicos entre parches de bosques fragmentados por actividades agrícolas y ganaderas. Las fincas de la empresa se encuentran ubicadas en la zona de Guanacaste y Alajuela. El jardín clonal y el vivero para la producción de plántulas y la industria para el procesamiento de madera están ubicados en Santa Rosa de Pocosol en la provincia de Alajuela. Los puntos de venta están en Río Segundo, Pavas, Palmares, Comunidad Guanacaste, Santa Rosa de Pocosol, Desamparados y Taras.

4.1.2.1.2 Del Producto

El Tablame Premium constituye un tablero listonado de madera sólida de la especie *Gmelina arborea* (melina) fabricado con madera al horno con un contenido de humedad de $(8\pm 2)\%$ y tratada con inmersión-difusión con sales de boro. Sus dimensiones son 1,22 metros de ancho, 2,44 metros de largo y 18 milímetros de espesor. Presenta dos caras de madera limpia sin nudos, ni medula y sin efectos de maquinados al ser presentación de calidad premium. Su uso es para la fabricación de muebles de todo tipo, divisiones de pared, reforzamientos de vigas de metal, estantería y paneles de puertas.

4.1.2.2 Determinación de la Unidad Funcional

La unidad funcional de este estudio se definió como “1 (un) Tablame Premium de melina de $1,22\text{ m} * 2,44\text{ m} * 18\text{ mm}$ entregado en el punto de venta de Río Segundo de Alajuela de Maderas Cultivadas de Costa Rica”.

4.1.2.3 Determinación del Flujo de Referencia

Se definió el flujo de referencia como 1 Tablame Premium de $1,22\text{ m} * 2,44\text{ m} * 18\text{ mm}$.

4.1.2.4 Límites del Sistema

Las etapas del ciclo de vida considerados en el presente estudio según la RCP seleccionada corresponden a fase de producción constituida por la extracción de recursos, la fabricación del producto terminado y la distribución. La fase de fin de vida se excluyó del alcance del estudio debido a la falta de disponibilidad de datos e incertidumbre en la etapa de tratamiento y disposición de los residuos generados. La Figura 4-1 muestra el diagrama de flujo del ciclo de vida del Tablame Premium seleccionado y los límites del sistema.

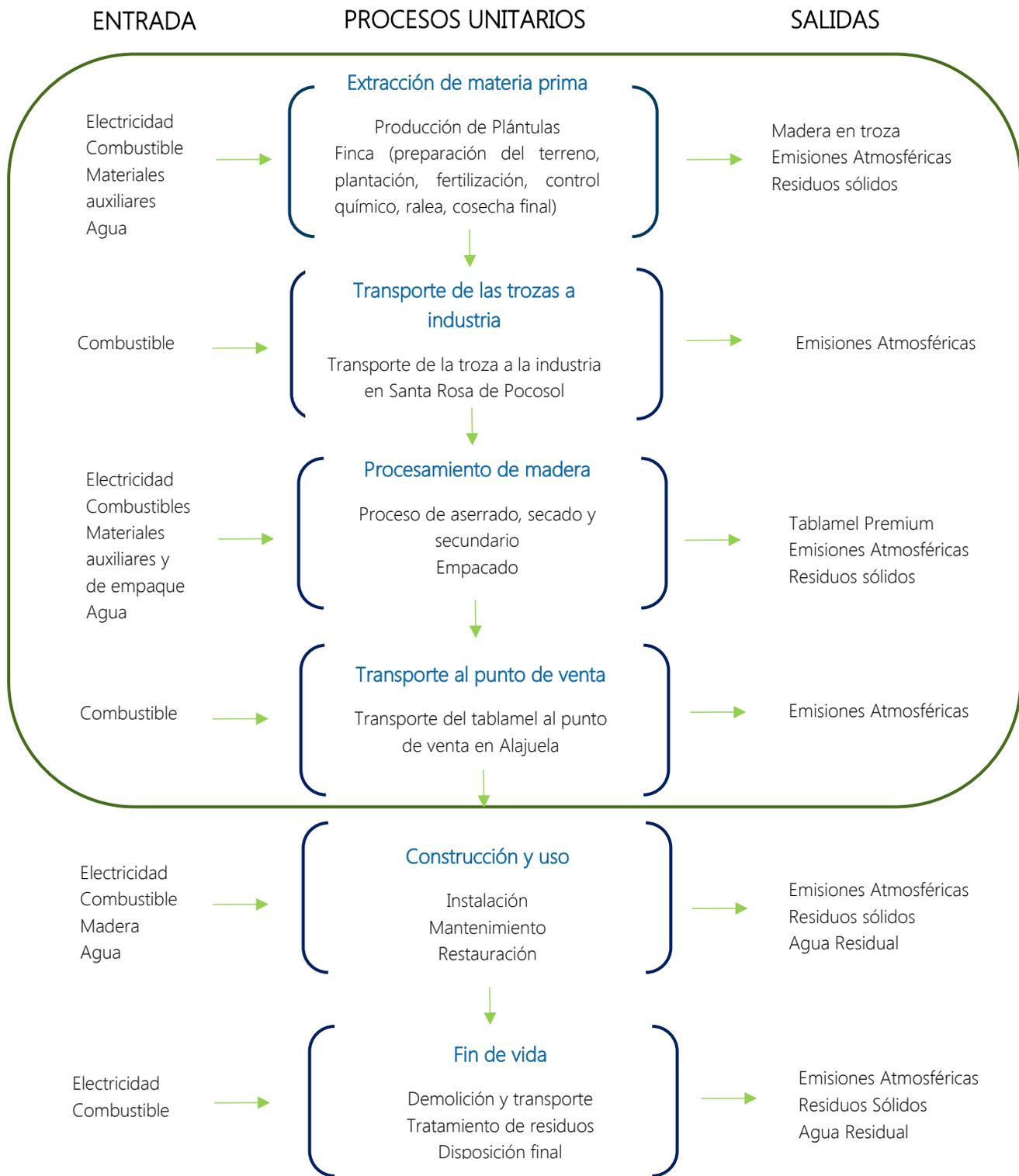


Figura 4-1. Límites del sistema para el ACV del tablame premium de MCC.

4.1.2.5 Unidades y Cantidades

Se utilizó el Sistema Internacional de Referencia (SI) y los datos se presentaron con dos cifras significativas.

4.1.2.6 Alcances

4.1.2.6.1 Técnico

Los procesos productivos incluidos en el alcance técnico para la realización del estudio de ACV fueron:

- Producción de plántulas
- Transporte de almácigos a finca
- Preparación de terreno de cultivo
- Método mecánico de plantación
- Aplicación de fertilizantes y controles químicos
- Método mecánico de poda
- Actividades de ralea
- Cosecha final
- Captura de carbono en finca
- Transporte de troza a aserradero
- Procesamiento de madera
- Embalaje
- Transporte de tablameles al punto de venta de MCC
- Residuos sólidos generados en la fase de procesamiento de madera
- Fabricación de materia prima utilizada
- Transporte de materia primera utilizada

Los procesos productivos excluidos del estudio fueron:

- Actividades de cambio de uso de suelo
- Generación de residuos en finca y su respectiva emisión de carbono
- Proceso de desinfección de plántulas con Vitabax
- Uso de lubricantes para el mantenimiento de maquinaria en industria

4.1.2.6.2 Geográfico

Los procesos de producción de plántulas se tomaron de la industria de Maderas Cultivadas de Costa Rica ubicado en Santa Rosa de Pocosol, San Carlos, Alajuela. Los datos correspondientes a los procesos de finca fueron provenientes de la visita a la finca San Humberto ubicada en San Jorge, Los Chiles, Alajuela. Los datos hectáreas totales de melina

(*Gmelina arborea*) sembradas en el año 2016 y su respectiva ubicación para el cálculo del transporte a industria se presentan en el Cuadro 4-1.

Cuadro 4-1. Datos de área total de plantación y distancia de las fincas para el periodo de plantación 2016.

Finca	Área total de plantación (ha)	Área de plantación de melina (ha)	Distancia a industria (km)
El Ensayo	8,65	8,65	188,7
Laura	73,48	69,06	54,5
San Humberto	40,63	40,63	17,5
Wendy	211,62	198,11	46,5

Los procesos de aserradero, secado y procesamiento secundario corresponden a los obtenidos en la industria en Santa Rosa de Pocosol. Por último, para el proceso de distribución del producto terminado se utilizó el punto de ventas de Maderas Cultivadas de Costa Rica ubicado en Río Segundo, Alajuela.

4.1.2.6.3 Temporal

Los datos utilizados para la producción de plántulas y la etapa de finca correspondieron al año 2016. Para el estudio se emplearon los datos para la producción de plántulas y etapa de finca de dicho periodo debido a que a partir del año 2016 se trabaja exclusivamente con un jardín clonal para el mejoramiento de la calidad estructural y fitosanitaria de la madera obtenida en la etapa de cosecha final mediante la selección genética de árboles. Asimismo, a partir del año 2015 en la etapa de finca se implementan programas de silvicultura de precisión y de fertilización y nutrición para obtener un mayor rendimiento por hectárea. Dichos cambios de metodología implican variación en los insumos y las dosis de aplicación por lo que la recolección de datos se generó con las condiciones actuales de producción con la finalidad de obtener resultados de impactos ambientales congruentes con la modalidad utilizada en el periodo 2016-2017. Las etapas de procesamiento de madera, compuesta por aserradero, secado y secundario, y distribución al punto de venta utilizaron datos del periodo fiscal 2016-2017. La matriz energética se modeló a partir de los datos reportados para el año 2016 debido a que los datos del año 2017 aún no estaban disponibles en el momento de la realización del estudio.

4.1.2.6.4 De naturaleza

Los flujos que corresponden a uso de recursos de la naturaleza fueron la matriz energética en la totalidad de etapas del ciclo productivo y el agua para las dosis de fertilizantes y químicos en las fases de producción de plántulas y finca. Los flujos salientes de la naturaleza considerados en el estudio son las emisiones atmosféricas por uso de combustibles fósiles y electricidad en la etapa de finca, aserradero, procesamiento secundario y transporte.

4.1.2.6.5 Inclusiones y Exclusiones

Se incluyó dentro del alcance del estudio de ACV:

- Los transportes aguas arriba de los insumos para la producción del Tablame Premium
- Las etapas de producción de plántulas, finca y procesamiento de madera para la fabricación de una unidad de Tablame Premium
- El material de envasado de la materia prima
- El tratamiento de los residuos de envases

Los procesos excluidos del estudio de ACV son:

- Funciones administrativas de la empresa
- Insumo de capital
- Infraestructura de la industria y vivero
- Transporte de empleados a la empresa
- Los procesos de fin de vida del producto

4.1.2.6.6 Suposiciones

- Se asumió para la etapa de finca un año promedio de control químico para el cálculo de los insumos debido a la variabilidad del tipo de producto requerido y su dosis por tipo y resistencia de maleza presente de hoja ancha y/o gramíneas. Se utilizó 3 controles químicos constituidos por un tratamiento con Metsulfuron para la totalidad de hectáreas de melina, un segundo control con Crosser, Roundup, Gallo y sulfato de amonio para la mitad de las hectáreas sembradas y un último control con Gramuxon y Gallo para la mitad de las hectáreas con establecimiento de melina en el año 2016.

- Se asumió consumos promedio de cal dolomita y carbonato de calcio por árbol para la fase de preparación de terreno en la etapa de finca.
- Se asumió que todas las rutas tomadas por los camiones y barcos corresponden a las trazadas por Google Maps y sea-distance.org respectivamente.
- Para los insumos fabricados en otros países referentes al proceso de producción de plántulas, finca y procesamiento de madera se consideró que sólo existían los siguientes transportes: desde la fábrica hasta el puerto más cercano, desde el puerto de exportación al Puerto de JAPDEVA en Limón o Puerto Caldera en Puntarenas, desde el puerto en Costa Rica a la planta de distribución y desde la planta de distribución hasta la industria de MCC ubicada en Santa Rosa de Pocosol.
- Para el procesamiento de madera en la fase de aserradero se asumió el uso exclusivo de la maquinaria con patrón para diámetro menor para el cálculo de la electricidad requerida en el proceso debido al tipo de troza obtenido en plantación de turno corto.
- Se utilizó los datos de precipitación diaria de la estación meteorológica Betania, Cutris número 69699, provistos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), para el cálculo del consumo de agua por riego en el jardín clonal, el cual es exclusivo de días secos.
- Se asumió una eficiencia esperada de 80% para la maquinaria con motores con capacidad de potencia mayor a 45 HP y del 75% para motores con capacidad de potencia menor a 45 HP. Para la totalidad de maquinaria utilizada en el procesamiento de madera se consideró un porcentaje de carga del 75% para el cálculo de la electricidad.

4.1.2.6.7 Limitaciones

- No se puede dar trazabilidad a los datos de las etapas de producción de plántulas y finca para la madera utilizada en la producción de Tablameles Premium para el periodo fiscal 2016-2017 debido a que no existe registro de estos por antigüedad de la información. Los procesos de producción de plántulas y finca para las órdenes de tablamel en estudio fueron efectuados hace 13-14 años aproximadamente. Los datos utilizados para dichas etapas son los provistos para el año de plantación del 2016

consecuente a la disponibilidad para la recolección de insumos y dosis aplicadas en el programa de silvicultura de precisión.

- La dosis de los insumos de la etapa de finca para preparación del terreno y la etapa de finca son dependiente a las condiciones de pH del terreno y la maleza presente las cuales son determinadas por el ingeniero forestal mediante visitas al campo, sin embargo, no se lleva un registro para el control de este. La cantidad de insumos utilizados fue basada en consumo promedio de las plantaciones.
- En el caso de los insumos en finca de cobretane y pintura, no existía la posibilidad de determinar el tipo de empaque específico debido a que se compran de diferentes presentaciones según la necesidad de dosis y no se lleva un registro de compra.
- El ACV realizado utiliza una RCP para productos de madera específica para Norteamérica debido a la inexistencia de un RCP de aplicación internacional o para la región de Latinoamérica.
- El estudio realizado no contempla los procesos de verificación por parte de un verificador independiente y un verificador de tercera parte según especifica la INTE/ISO 14025: 2007.

4.1.2.6.8 Calidad de los datos

La fuente de los datos por etapa del ciclo de vida es especificada en el Cuadro 4-2.

Cuadro 4-2. Fuente de datos por etapa del ciclo de vida del tablamel premium.

Etapa del Ciclo de Vida	Fuentes de Datos Especificada
Extracción de Materia Prima	Datos secundarios
Producción de Insumos	Datos primarios y secundarios
Producción de Plántulas	Datos primarios
Finca	Datos primarios
Procesamiento de Madera	Datos primarios
Transporte de insumos y producto terminado	Datos primarios

4.1.2.7 Reglas

4.1.2.7.1 Reglas de Corte

Se incluyó más del 95% del potencial de impacto ambiental asociado a la unidad funcional por flujos de masa y energía. Las reglas de corte utilizadas en el estudio según la RCP seleccionada son:

- Masa: flujos de masa con menos del 1% del total acumulado por unidad del proceso pueden ser excluidos, siempre que su relevancia ambiental sea insignificativa.
- Energía: flujos de energía con menos del 1% del total acumulado por unidad del proceso pueden ser excluidos, siempre que su relevancia ambiental sea insignificativa.
- Relevancia ambiental: si un flujo cumple con los dos criterios anteriores, pero se determina que contribuye con el 2% o más a las categorías de impacto seleccionadas debe incluirse dentro del límite del sistema.

4.1.2.7.2 Reglas de Asignación

Según la RCP seleccionada, las reglas de asignación en un proceso de producción donde se genera más de un tipo de producto se deben asignar los flujos ambientales (entradas y salidas) del proceso a los diferentes productos para obtener inventarios basados en la contribución respectiva de cada producto. Para el caso de las salidas del proceso se deben basar en propiedades físicas (flujos de masa y volumen) y para las entradas al sistema en la composición física o estequiometría.

En el ACV realizado no se utilizaron reglas de asignación por tipo de producto debido a que la empresa genera órdenes de producción específicos para el Tablamele Premium para la etapa de procesamiento de madera. En el caso de la electricidad, los kWh totales se calcularon en base a los rendimientos de troza corta y horas de producción específicos por orden de tablameles para las fases de aserradero y secundario respectivamente. Por último, los datos de finca utilizados son correspondientes al manejo de las plantaciones de melina y son asignados al proceso mediante el rendimiento por hectáreas.

4.1.2.7 Desarrollo de Módulos

La información obtenida para el desarrollo de módulos según la corriente (arriba, central y abajo) y los procesos que la componen es descrita en el Cuadro 4-3, Cuadro 4-4 y Cuadro 4-5.

Cuadro 4-3. Fuentes de información de los procesos corriente arriba

Proceso	Fuentes de Información
Producción de plántulas	Se obtuvieron los datos mediante la entrevista al ingeniero forestal encargado del manejo del jardín clonal y vivero. Los datos de dosis de insumos son los estipulados en el paquete de fertilización estándar de MCC para las plantaciones de melina. Los datos de precipitación diaria en la zona corresponden a los provistos por IMN para la estación meteorológica Betania, Cutris número 69699 para el cálculo del agua por riego en días secos.
Producción de insumos	Se obtuvieron los insumos utilizados y sus respectivas cantidades a partir del registro de órdenes de producción, rendimiento de aserradero y programas de fertilización y nutrición de la empresa MCC para el periodo fiscal 2016-2017 para procesamiento de madera y el año 2016 para la etapa de finca y producción de plántulas. Se determinaron las empresas productoras y distribuidoras a través de la entrevista con el encargado de proveeduría. Asimismo, se realizó consulta telefónica al distribuidor Maxitec, principal proveedor de insumos para las fases de finca y producción de plántulas, acerca de las empresas productoras. Las hojas de seguridad fueron obtenidas mediante la búsqueda en internet en la página de la empresa productora o la solicitud de esta en la empresa distribuidora. Las distancias desde la planta de producción al sitio de distribución y/o venta se obtuvieron utilizando Google Maps y www.sea-distances.org .
Envasado de los insumos	Se obtuvo la información del tipo y tamaño de envase para cada producto mediante la visita a las bodegas de la empresa MCC y Agricultores Unidos en Cartago para los insumos que no se encontraron en bodega el día de la visita. El peso del envasado se obtuvo mediante la consulta al encargado de bodega en MCC, Maxitec (distribuidor) y Agricultores Unidos en Cartago.
Producción de electricidad	Se utilizó la información de la matriz energética costarricense del 2016 y se calculó la energía producida por los residuos de aserrín para el proceso de secado.

Continuación del Cuadro 4-3.

Proceso	Fuentes de Información
Producción de combustibles	Se calculo la distancia desde RECOPE hasta el proveedor Transportes MyN del Molino y desde Transportes MyN del Molino hacia la industria de MCC.

Cuadro 4-4. Fuentes de información de los procesos de la corriente central.

Proceso	Fuentes de Información
Transporte de insumos a industria	Se utilizó Google Maps para calcular las distancias del distribuidor o productor de los insumos a MCC.
Transporte de industria a finca	Se utilizaron las bases de datos provistas por MCC y se realizó entrevistas al encargado de producción en industria e ingeniero forestal en finca para la obtención de datos específicos de rendimiento de procesos y paquete de fertilización y silvicultura respectivamente. Se realizaron mediciones en la industria para la obtención de la cantidad de plástico utilizado en las fases de secado y embalaje final.
Producción de plántulas	
Finca	
Aserradero	
Secado	
Secundario	
Embalaje del producto terminado	
Manejo de desechos de finca e industria	

Cuadro 4-5. Fuentes de información de los procesos de la corriente abajo.

Proceso	Fuentes de Información
Transporte al punto de venta	Se utilizó la distancia establecida por el encargado de logística para la distribución del producto terminado.
Gestión de desechos envases	Se utilizó la información brindada por entrevistas al ingeniero forestal y encargado de producción de MCC.

4.1.2.8 Selección del método de impacto ambiental

Se utilizó el programa SimaPro 8.5.0 y la base de datos Ecoinvent 3.1. Este programa corresponde a un software de amplia trayectoria a nivel internacional para la realización de ACV el cual incluye una interfaz para modelar el sistema de producto, una base de datos de procesos por ciclo de vida y diversas metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida según factores de caracterización (Herrmann & Moltesen, 2015).

Para el cálculo de las categorías de impacto ambiental de potencial de cambio climático, acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos y el agotamiento de agua se utilizó el método Recipe MidPoint (H). Este método utiliza factores de caracterización para proveer información del impacto ambiental a

nivel medio, el cual utiliza modelos de caracterización validados científica y técnicamente a nivel global (Goedkoop *et al.*, 2013). El método Recipe MidPoint (H) permite la evaluación de 17 categorías de impacto ambiental las cuales se muestran en el Cuadro 4-6.

Cuadro 4-6. Categorías de impacto ambiental evaluados por el método Recipe MidPoint (H).

Categoría de impacto potencial	Indicador
Cambio climático	kg CO ₂ eq
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq
Toxicidad humana	kg 1,4 DB eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC
Formación de material particulado	kg PM ₁₀ eq
Radiación	kg ²³⁵ U eq
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq
Eutrofización en agua dulce	kg P eq
Eutrofización marina	kg N eq
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4 DB eq
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4 DB eq
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DB eq
Ocupación de suelo agrícola	m ² a
Ocupación de suelo urbano	m ² a
Transformación de suelo natural	m ²
Agotamiento de metales	kg Fe eq
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq

Para el cálculo del consumo de energía primaria en el proceso y su composición se utilizó la metodología Demanda Cumulativa de Energía (CED, por sus siglas en inglés). Dicho método provee un indicador del consumo de energía durante la totalidad del ciclo de vida, incluido el uso de energía directa e indirecta por procesos de producción de materia prima; el cual permite la obtención de resultados equivalentes con otras metodologías asegurando su eficacia para la evaluación del desempeño ambiental (Liu, Li, Fang & Guo, 2018). Las categorías de consumo de energía evaluadas se describen en el Cuadro 4-7

Cuadro 4-7. Categorías de impacto ambiental evaluadas por el método CED.

Categoría de impacto potencial	Indicador
Energía no renovable, fósil	MJ
Energía no renovable, nuclear	MJ
Renovable, solar, eólica, y geotérmica	MJ
Renovable, biomasa	MJ
Renovable hidroeléctrica	MJ

Para la comparación del estudio con el ACV para el tablero DM de producción en Brasil se utilizó la metodología CML-IA baseline para la evaluación de las categorías de impacto de potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de recursos abióticos. Dicha metodología fue la seleccionada por el estudio en referencia por lo tanto la utilizada con la finalidad de poder comparar los resultados de impacto ambiental.

4.1.2.9 Interpretación de los resultados del ACV

La interpretación de los resultados del ACV se realizó analizando los impactos ambientales de las categorías de impacto ambiental y la caracterización de estos por la contribución por los insumos y procesos del ciclo de vida. Adicionalmente, se realizó una comparación del estudio realizado con otros ACV para productos de madera.

4.1.3 Tratamiento de carbono biogénico

La RCP seleccionada establece el cálculo del carbono fijado en la plantación forestal mediante el principio del equilibrio de carbono del bosque para el reporte de la huella de carbono. A su vez, se estipula que el cálculo de carbono fijado en finca se debe excluir en ACV con alcance de la cuna a la puerta. Para el estudio, se realizó el cálculo como ejercicio académico para la evaluación del balance de carbono en el proceso, sin embargo, este no se reportó en los resultados de la DAP concordando con los lineamientos de la RCP.

Se utilizó el estudio de Cortés (2016) para el Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una plantación de *Gmelina arborea* en los Chiles, Alajuela de MCC. Los datos utilizados para el cálculo de fijación de carbono en finca son el valor acumulado de carbono y CO₂ e de 12,97 y 47,59 Mg ha⁻¹.

4.2 FIJACIÓN DE CARBONO EN EL PRODUCTO TERMINADO

La fijación de carbono en el producto final fue calculada mediante la estimación del contenido de carbono acumulado en biomasa del tablamel. Los datos utilizados para el cálculo del contenido de CO₂ fijado en el tablamel premium se presentan en el Cuadro 4-8.

Cuadro 4-8. Datos requeridos para el cálculo del contenido de CO₂ fijado en el producto terminado

Dato	Valor	Referencia
Volumen tablamel	0,054 m ³	Cálculo propio
Densidad	0,43 ton biomasa/m ³	Moya <i>et al.</i> , 2010.
Contenido de carbono	0,49 C/ton biomasa	IPCC, 2016.
Relación CO ₂ /C	3,67 CO ₂ /C	IPCC, 2016.
Total producción tablamel	4770	MCC, 2017.

El cálculo utilizado para obtener el resultado de CO₂ fijado en el producto terminado es descrito por la ecuación:

$$Fijación CO_2 = 0,054 m^3 * 0,43 ton/m^3 * 0,49 C/ton * 3,67 CO_2/C$$

$$Fijación CO_2 = 41,76 kg CO_2$$

$$Fijación CO_2 Total producción = 199,18 ton CO_2$$

4.3 IDENTIFICACIÓN DE RETOS PARA EL ECO-ETIQUETADO EN EL SECTOR FORESTAL

La identificación de los retos para la implementación del eco-etiquetado en el sector forestal en Costa Rica se realizó a través de entrevistas semiestructuradas. Las entrevistas se ejecutaron 4 personas que laboran en la industria de producción forestal o proveeduría y distribución de madera aserrada. Adicionalmente, se complementó la información obtenida con la revisión bibliográfica de los retos en la aplicación de las DAP en Costa Rica.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 SELECCIÓN DE LA REGLA DE CATEGORÍA DE PRODUCTO

Para la elaboración de la DAP para el Tablamel Premium se seleccionó la regla de categoría de producto específica para Productos de madera para uso constructivo y arquitectónico para Norteamérica. Dicha escogencia fue debida a que al momento de la realización del estudio la RCP específica para productos de madera de carácter global del Internacional EPD System se encontraba en proceso de revisión de manera que no fue factible su utilización. La RCP aplicable en dicho operador de programa corresponde para productos de construcción de diferentes materias primas. La selección de la RCP se basó en la especificidad del documento para la producción de madera mediante el uso lineamientos que provean orientación sobre la forma en que se delimitan las diferentes etapas del ciclo de vida del proceso, las fuentes de datos que pueden usarse para estas fases, la unidad de referencia para usar en los cálculos y los factores para caracterizar los impactos ambientales de las emisiones (Ingwersen & Stevenson, 2012). Es así como se utilizó un documento que delimita las etapas del ciclo de vida de extracción de materia prima, industria, uso en construcción y fin de vida para la cuantificación de categorías de impactos ambientales referentes a la producción de productos de madera.

5.2 ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEL TABLAMEL PREMIUM

El Cuadro 5-1 muestra los datos iniciales para los cálculos para la transformación de la información obtenida de los procesos de producción de plántulas, finca, procesamiento de madera y transporte a la unidad funcional del estudio (una unidad de Tablamel Premium de 2,44 m * 1,22 m * 18 mm).

Cuadro 5-1. Datos iniciales necesarios para la conversión de la información en términos de una unidad de tablamel premium.

Datos Iniciales	Valor	Unidad	Referencia
Hectáreas sembradas	316,45	ha	(MCC,2017)
Rendimiento por hectárea	160	m ³ /ha	(MCC,2016)
Cantidad de árboles por hectárea	830	árbol/ha	(MCC,2016)

Continuación del Cuadro 5.1.

Datos Iniciales	Valor	Unidad	Referencia
Rendimiento maquinaria diámetro menor (Aserradero)	62	%	(MCC,2017)
Rendimiento secundario	83,5	%	(MCC,2017)
Tablameles producidos	4770	unidades	(MCC,2017)
Volumen Tablameles Producidos	223,5	m ³	Cálculo propio
Hectáreas requeridas para producir un Tablamel Premium	0,0011	ha/unidad funcional	Cálculo propio
Árboles requeridos para producir un Tablamel Premium	0,88	árbol/unidad funcional	Cálculo propio
Volumen de madera entrante a aserradero para producir un Tablamel Premium	0,17	m ³	Cálculo propio
Volumen de madera entrante a secundario para producir un Tablamel Premium	0,10	m ³	Cálculo propio
Cantidad de residuos de aserrín requeridos para el secado por unidad funcional	2,55	kg	Cálculo propio

5.2.1 Producción de Plántulas

La primera etapa en análisis fue la producción de plántulas donde se obtiene un clon (estaca), mediante la reproducción por yema, de 1-1,20 metros de alto para la posterior plantación en finca. Dicha etapa requiere de un paquete de fertilización para el jardín clonal y la fase de vivero para el crecimiento óptimo de la plántula. En la fase de jardín clonal se utiliza un

proceso de fertilización por semana y riego en días secos para el mantenimiento adecuado de los lotes de plantación. El jardín clonal utiliza 3 clones a nivel comercial para la especie *Gmelina arborea* (melina) los cuales son seleccionados genéticamente por su potencial de crecimiento y calidad de troza. Por su parte, la fase de vivero se divide en invernadero y campo donde se provee a la plántula las condiciones de temperatura, humedad y nutrientes requeridos para su establecimiento. El invernadero a su vez se compone de dos subetapas las cuales son el proceso de enraizamiento y aclimatación. Asimismo, esta etapa incluyó el transporte de las plántulas a las fincas El Ensayo, San Humberto, Laura y Wendy con plantación de melina para el año 2016. La información correspondiente a las hectáreas de melina establecidas por finca y su kilometraje de la industria se detalla en el Cuadro 4-1. Los insumos correspondientes al paquete de fertilización y las bases de datos utilizadas se presentan en el Apéndice 1 y el Apéndice 6 respectivamente. Los resultados de la evaluación ambiental de la etapa de producción de plántulas se muestran en la Figura 5-1.

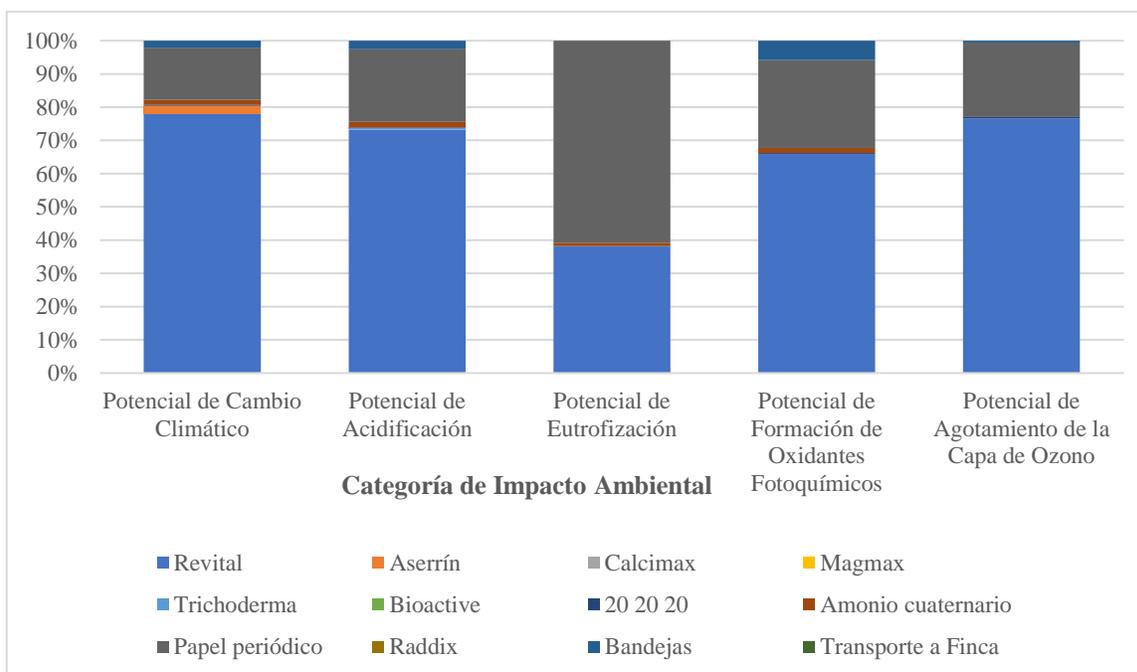


Figura 5-1. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de producción de plántulas.

Los resultados obtenidos fueron 0,083 kg CO₂ eq para la categoría de cambio climático, 0,00025 kg SO₂ eq para el potencial de acidificación y 0,00014 kg NMVOC para el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Según los resultados generados por el análisis de eco puntos, el potencial de eutrofización y el potencial de agotamiento de la capa de ozono

resultaron impactos ambientales potenciales de carácter insignificante debido a su contribución a la huella ambiental fue menor al 1%, en concordancia con la norma ISO 14044. Como se puede observar en la Figura 5-1 el insumo Revital resultó el contribuyente mayoritario en cambio climático y acidificación. Dicho resultado es debido a que el Revital constituyó el insumo con la mayor cantidad de dosis requerida del paquete de fertilización del jardín clonal en comparación con los demás insumos. En la categoría de cambio climático, el fertilizante Revital generó un 78,3% de la huella de carbono debido a su composición de nitrato de amonio (NH_4NO_3) a una concentración del 45%, por consiguiente, el insumo con mayor cantidad de nitrógeno por unidad funcional. La incidencia del fertilizante nitrogenado Revital en la categoría de cambio climático fue por la emisión de óxidos nitrosos (N_2O), compuesto que presenta un potencial de calentamiento global 265 veces mayor que el CO_2 (Roche *et al.*, 2016). Según Krzyzaniak, Stolarski & Warminski (2018), el principal impacto del uso de fertilizantes nitrogenados son las emisiones de CO_2 eq causadas por procesos de nitrificación y desnitrificación posteriores a la aplicación en campo. Por su parte, la producción de nitrato de amonio generó el 60,6% de la contribución por uso del fertilizante Revital en huella de carbono resultante. Las emisiones de N_2O producidas en la fase de producción de fertilizantes están relacionadas a los procesos de combustión de diésel en planta y transporte (Hasler, Broring, Omta & Olf, 2015). Adicionalmente, el uso de papel periódico para la preparación de las plántulas generó el 15,7% del potencial de cambio climático debido al proceso de producción del insumo. En el programa SimaPro para se utilizó la base de datos de papel periódico Row (Resto del mundo, por sus siglas en inglés) para modelar la fase del ciclo de vida de producción del insumo, ya que no existe el insumo con producción en Costa Rica. Dicha base de datos considera procesos de producción, referentes a consumo eléctrico, materia primas y generación de residuos, provenientes de una ponderación de procesos a nivel mundial. Por consiguiente, en el estudio se presentó una limitante en el análisis del impacto ambiental por uso de papel periodo debido a que al utilizar bases de datos Row se puede generar un impacto mayor o menor en congruencia con el tipo de producción implementada.

Además, el fertilizante Revital generó el 72,2% del potencial de acidificación específicamente por las emisiones de N_2O causadas por el contenido de nitrógeno y el proceso de producción del nitrato de amonio. Según Schmidt, Bancenetti, Fusi & Niero

(2017), las emisiones de nitrógeno por uso de fertilizantes afectan significativamente las categorías de cambio climático, acidificación y eutrofización. Se debe destacar que el N₂O constituye el gas con mayor potencial de agotamiento de la capa de ozono por lo que el uso de dosis óptimas de fertilizantes es primordial para la mitigación de emisiones de CO₂ eq y su potencial impacto de calentamiento (Bell *et al.*, 2015). El uso de papel periódico incidió de manera significativa en la huella de acidificación con un aporte del 21,6% resultante de la fase de generación de este por consumo de electricidad.

En cuanto al potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, se presentó un comportamiento similar en comparación con las otras categorías de impacto ambiental. Las fuentes principales del impacto fueron por el consumo del fertilizante foliar Revital con un 65,1% y el uso de papel periódico con un aporte del 26,1%.

5.2.2 Finca

La etapa de finca se dividió en 8 subprocesos: preparación del terreno, plantación, fertilización, control químico, poda, ralea, cosecha final y por último transporte a industria. Los subprocesos de preparación del terreno, aplicación de fertilizantes, control químico y poda utilizaron las dosis estipuladas en el programa de silvicultura de precisión implementado a partir del año 2016. La fase de preparación del terreno se basó en un consumo promedio por árbol requerido de insumos de carbonato de calcio y cal dolomita debido a que las dosis son dependientes del pH del suelo. En el caso del control químico, se utilizó igualmente un año promedio de consumo de químicos para la modelación. La dosis de insumos varía de 3 a 4 controles químicos por área de plantación según el tipo de maleza presente en la finca por la cantidad de lluvia en la zona. Por lo tanto, se utilizan 3 controles químicos los cuales se componen de herbicidas, fungicidas y coadyuvante para optimizar la aplicación.

Las fases de plantación y poda se realizan de manera manual para la totalidad de hectáreas por lo que no se requiere el consumo de combustibles fósiles. Asimismo, la aplicación de químicos pre emergentes, para la fase de preparación del terreno, fertilizantes foliares y controles químicos presentan la misma metodología manual. Las entradas de combustibles fósiles para la finca de diésel y gasolina son correspondientes a la maquinaria requerida para los subprocesos de preparación de terreno (tractor oruga y agrícola), ralea (motosierra) y

cosecha final (motosierra y cargador). Con respecto a la entrada de agua a la etapa de finca, las plantaciones únicamente presentan riego por precipitación y la cantidad de agua utilizada es la requerida para preparar las mezclas de químicos para la preparación del terreno y el control químico. Los datos de insumos al igual que las bases de datos utilizadas y sus respectivas dosis se encuentran en el Apéndice 1 y el Apéndice 6.

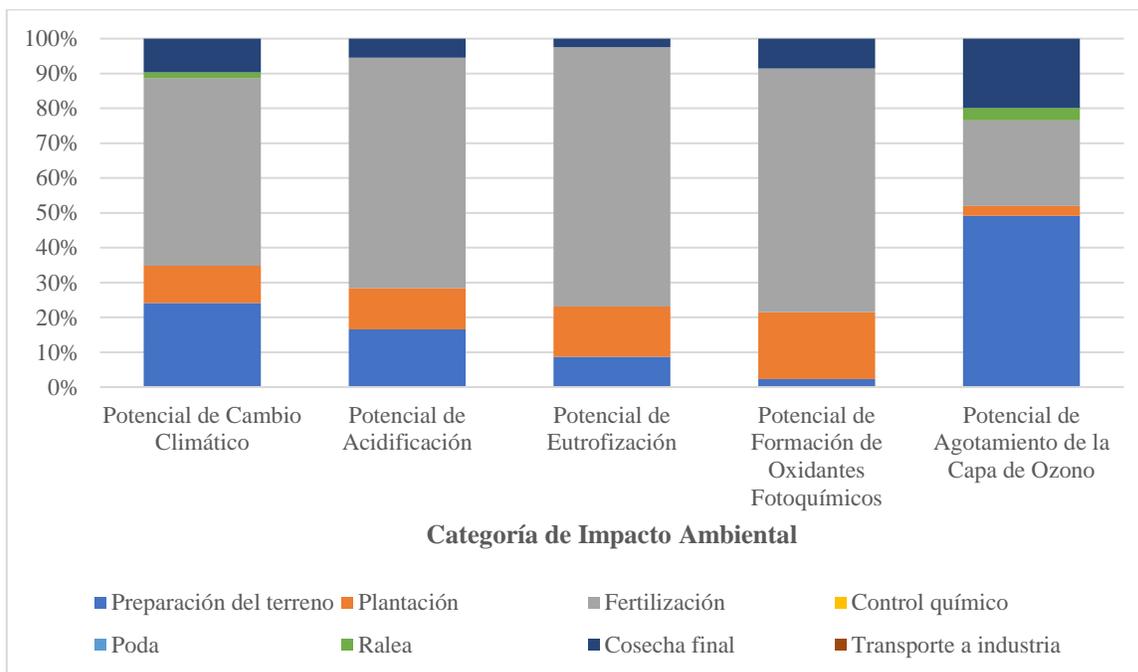


Figura 5-2. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de finca.

Al analizar la Figura 5-2 se determinó que los subprocesos de control químico, poda y transporte a industria no generaron un potencial de impacto ambiental significativo en la etapa de finca, el cual fue menor al 1%. Este resultado se atribuyó a que las dosis requeridas de químicos (control químico) y pintura y cobretane, los cuales actúan como desinfectes en la fase de poda, presentan la menor dosis consumo por hectárea en finca. Por lo tanto, la cantidad total consumida por hectárea fue insignificante en comparación con otros insumos generando un aporte de potencial de impacto ambiental nulo para la etapa de finca. A su vez, la fase de fertilización obtuvo el mayor potencial impacto ambiental con un 53,8% del potencial de calentamiento, 64,9% de acidificación, 69,2% de eutrofización y 56,4% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. En el caso del potencial de agotamiento de la capa de ozono la fase de fertilización representó la segunda fuente de impacto en dicha categoría con un aporte del 24,3%.

Seguidamente, la segunda fase con mayor contribución a las categorías de impacto ambiental fue la preparación del terreno, la cual generó el 24,1% del potencial de cambio climático, 16,3% del potencial de acidificación, 8,1% del potencial de eutrofización y 1,9% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Para el potencial de agotamiento de la capa de ozono, la etapa de preparación del terreno fue la de mayor significancia con un 48,8%. Por su parte, la fase de plantación obtuvo un 10,6% del potencial de cambio climático, 11,6% de acidificación, 13,4% de eutrofización, 2,8% de agotamiento de la capa de ozono y 15,4% de formación de oxidantes fotoquímicos. La cosecha final produjo el 9,6% del potencial de cambio climático, 5,4% del potencial de acidificación, 2,3% del potencial de eutrofización, 19,7% del potencial de agotamiento de la capa de ozono y el 6,9% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Finalmente, la fase de ralea representó la fase con menor aporte al potencial de impacto ambiental significativo a la etapa de finca con el 1,64% del potencial de cambio climático y el 3,6% del agotamiento de la capa de ozono.

Según los resultados por el análisis de eco-puntos, se determinó que el mayor impacto ambiental fue por el uso de fertilizantes nitrogenados, contribuyendo de forma mayoritaria en la totalidad de categorías evaluadas. Este aporte es evidenciado en los resultados obtenidos en la fase de fertilización, la cual constituye el subproceso con mayor potencial de impacto ambiental de la etapa de finca. El consumo de diésel en las fases de preparación del terreno y cosecha final representó el segundo aporte al potencial impacto ambiental en las huellas de carbono, acidificación y eutrofización.

Los resultados obtenidos son congruentes con el estudio de Cambria & Pierangeli (2012), el cual establece que la labranza del terreno y el uso de fertilizantes nitrogenados generó el mayor impacto ambiental por consumo de diésel y por la alta tasa de volatilización de NH_3 respectivamente. En el caso de Madera Cultivadas de Costa Rica, el uso de fertilizantes nitrogenados, Rafos y Revital, es utilizado para la primera y segunda fertilización para la totalidad de las hectáreas. Las dosis de dichos fertilizantes son por árbol plantado, donde se obtiene un rendimiento de 830 árboles por hectárea, lo que implica un alto requerimiento en el consumo. Por lo tanto, los fertilizantes nitrogenados representaron la fuente principal de impacto ambiental consecuente a su uso intensivo en contraste con los demás insumos en

finca por la cantidad de nitrato de amonio en su composición 45% para Revital y 25% para Rafos.

Con respecto a la huella de carbono, el análisis de eco-puntos determino que el mayor impacto ambiental fue por uso de fertilizantes nitrogenados, los cuales generaron la totalidad del aporte a la huella de carbono de la fase de fertilización con un resultado 2,59 kg CO₂ eq. El estudio de Udvardi *et al.* (2015) demostró que el uso de N-fertilizantes es responsable por gran cantidad de emisiones, especialmente GEI, debido al proceso de producción y la emisión de NO₂ posterior a su aplicación debido a pérdidas gaseosas y lixiviación. Se puede generar una reducción de las emisiones provenientes mediante la aplicación fertilizantes nitrogenados con una tasa de volatilización de NH₃ más baja; además, igualar las demandas de los cultivos y aumentar la eficiencia del uso de nitrógeno eligiendo el momento adecuado para la fertilización (condiciones climáticas frescas y húmedas) pueden reducir el requerimiento de fertilizante y así las emisiones de NO_x y lixiviación de nitratos a cuerpos de agua (Cambria & Pierangeli, 2012).

Por su parte, el consumo de diésel produjo el impacto al potencial de cambio climático correspondiente a la fase de preparación de terreno debido a la emisión de GEI por procesos de combustión. Esta fase consiste en el barrido del total de hectáreas para el establecimiento de melina y la creación de una zanja de 90 centímetros para la plantación. Dicho trabajo de preparación es realizado por maquinaria con consumo elevado de diésel por hectárea, para la fase de barrido se utiliza un tractor agrícola de 200 L/ha y para la creación de la zanja un tractor agrícola y oruga de consumo de 40 L/ha y 100 L/ha respectivamente. Desde el ACV, las emisiones de GEI por el uso de derivados del petróleo son primordialmente por la combustión en maquinaria mientras que el suministro de combustible (exploración, extracción, refinería y transporte) representa el 20% de las emisiones a lo largo del ciclo de vida. Para el caso de plantaciones forestales, el consumo de combustibles fósiles presenta un alto impacto en el potencial de calentamiento global para la producción de madera donde se estima que una reducción del 20% en el consumo causa una reducción de 1,05 kg CO₂ eq/ m³ mientras que un incremento del 20% da como resultado un aumento de 1,07 kg CO₂ eq/ m³ (Valente, Spinelli & Gunnar, 2011).

Además, en la fase de finca se simuló el secuestro de carbono en la plantación en la categoría de cambio climático con el objetivo de analizar el comportamiento del balance de carbono para el proceso. Se utilizó como referencia el valor de fijación de CO₂ de 47,59 Mg/ha para una plantación de *Gmelina arborea* correspondiente a la finca San Clemente de MCC ubicada en los Chiles, Alajuela (Cortés, 2016). Debido a que la empresa MCC trabaja con programas de silvicultura y clones de la especie de melina se asumen condiciones de crecimiento de biomasa similares en la totalidad de las fincas por lo que el almacenamiento de CO₂ para las plantaciones en análisis se basa en el dato proporcionado por el estudio en la finca mencionada. El modelo de bosque normal (Normal Forest Model) indica que la absorción anual y la fijación de CO₂ es equivalente al carbono fijo en la biomasa cosechada y la posterior liberación de CO₂ por combustión o descomposición. Por lo tanto, se debe considerar el almacenamiento de CO₂ en la madera producida, lo cual es aplicable para plantaciones gestionadas permanentemente y se asume un número de parcelas iguales por periodo de rotación (cosecha final y plantación) (Hektor, Backeús & Andersson, 2016). El balance de carbono, considerando el equilibrio del proceso, se aplica al caso en estudio debido a que se utilizan realizan procesos de cosecha final y plantaciones por año generando una rotación entre la obtención de madera y el reemplazo por plántulas en crecimiento. Es así como se destaca la importancia de los productos de maderas por su capacidad de secuestro de CO₂ mediante planes de gestión forestal generando una compensación de las emisiones del proceso de finca y producción; así como proporcionar créditos de carbono por las emisiones de CO₂ evitadas cuando la madera sustituye el acero o concreto en construcción (Van Kooten, 2018).

En el caso de la huella de acidificación, el consumo de fertilizantes Rafos y Revital, generó el mayor potencial de impacto debido al amonio en su composición. El uso de Revital constituye el 67,4% de la huella de acidificación de la etapa de fertilización y el restante 32,6% por consumo del insumo Rafos. El consumo de diésel representó el total del aporte en la fase de preparación del terreno. Las actividades agronómicas para el establecimiento y mantenimiento de la plantación constituyen el 93% del potencial de acidificación debido a las emisiones de SO₂ para la producción de diésel el cual es utilizado en el rastrillado del terreno y las emisiones de fertilizantes, principalmente por el compuesto amonio (Cambria

& Pierangeli, 2012). De forma similar, se presentó el mismo comportamiento de aporte mayoritario por el uso de fertilizantes y diesel en la huella de eutrofización y potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Los procesos de combustión generaron la formación de óxidos nitros y el uso de N-fertilizantes la emisión de NOx y amonio al aire y al agua por erosión del suelo y solubilidad, los cuales implican el 50% del potencial de eutrofización por actividades de manejo forestal específicamente fertilización, cosecha final y transporte (Lopes *et al.*, 2015). Dicho estudio indica que el uso de combustibles fósiles en la fase de finca generó el 35% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, resultado comparable con el obtenido por consumo de diésel en la preparación del terreno y cosecha final.

Los resultados para la etapa de finca fueron 4,81 kg CO₂ eq para la categoría de cambio climático, 0,011 kg SO₂ eq para el potencial de acidificación, 0,00061 kg N eq para el potencial de eutrofización y 0,0066 kg NMVOC para el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. La categoría de potencial de agotamiento de la capa de ozono presentó un resultado no significativo para esta etapa debido a que su impacto ambiental potencial es menor al 1%.

Al considerar la captura de carbono en finca, la huella de carbono obtenida fue -45,73 kg CO₂ eq, resultado de carácter negativo debido al balance de carbono para la etapa de finca donde se establecen emisiones de CO₂ por uso de combustibles fósiles y fertilizantes en contraste con la fijación de carbono en la biomasa de los árboles. Para la modelación de CO₂ fijado en finca por la plantación, se calculó un valor de 50,5 kg CO₂ eq por unidad funcional, basado en el dato de hectáreas requeridas para la producción de una unidad de Tablame Premium. Por su parte, el programa SimaPro estableció una huella de carbono para la totalidad de los subprocesos de la finca de 4,81 kg CO₂ eq. Por lo tanto, el resultado obtenido indicó que la captura de carbono en la troza es mayor a las emisiones de CO₂ generadas en el proceso; estableciendo así que la capacidad de fijación de CO₂ en la biomasa permite generar un mecanismo de compensación de las emisiones a lo largo de las etapas de ciclo de vida. Dicho planteamiento es congruente con la RCP seleccionada la cual estipula la consideración del equilibrio de carbono para la plantación en el tratamiento de carbono biogénico en el ACV. La RCP asume que las reservas de carbono en la plantación son estables bajo el manejo forestal sostenible, las cuales se basan en el principio de gestión para

preservar la función de producción de bosque. Debido a la rotación en las plantaciones forestales, las disminuciones temporales de los reservorios de carbono resultantes de la cosecha en un sitio se compensan aumentos de las reservas de carbono en otros sitios. Adicionalmente, las directrices para estimar las emisiones antropogénicas de GEI del IPCC por uso de la tierra y actividades de la industria forestal determinan que se debe de incluir de manera obligatoria los reservorios de carbono en los productos de madera cosechada (Geng, Yang, Chen & Hong, 2017).

Es importante destacar que las fases de preparación de terreno, por el uso de químicos pre-emergentes, y el control químico no presentaron potenciales impactos ambientales significativos por su cantidad total en contraste con otros insumos. Sin embargo, se debe mencionar que en estas fases se utilizan herbicidas con potencial eco-tóxico por lo que es relevante generar un control adecuado de las dosis implementadas. Los herbicidas pueden contaminar cuerpos de agua, tierra y aire a través de mecanismos como la escorrentía, la lixiviación y la bioacumulación consecuentes al inadecuado manejo (dosis altas por hectárea), almacenaje y/o disposición final (Le Bellec *et al.*, 2015). Por ejemplo, en la fase de control químico se utilizó el producto Gramoxone el cual presenta de ingrediente activo el paraquat un herbicida dipiridilo. El paraquat es etiquetado como una neurotoxina ambiental y está asociado con un mayor riesgo de padecer enfermedades neurodegenerativas incluido el Parkinson (Wang, Souders, Zhao & Martyniuk, 2018). Según el Decreto N° 33495: Reglamento sobre Registro, Uso y Control de Plaguicidas Sintéticos Formulados, Ingrediente Activo Grado Técnico, Coadyuvantes y Sustancias Afines de Uso Agrícola (2007), el uso de paraquat en Costa Rica es de condición restringida mediante la venta bajo receta profesional. Además, el glifosato (Roundup), insumo utilizado en ambas fases, puede generar contaminación a aguas subterráneas, resistencia a los hercidacidas e inhibición del crecimiento de las plantas por consumo intensivo. Su uso se encuentra en discusión en la Unión Europea por su posible potencial cancerígeno (Van Bruggen *et al.*, 2018).

Adicionalmente, el herbicida Crosser, con el ingrediente activo 2,4-D, utilizado en el control de malezas se encuentra entre los contaminantes más ampliamente distribuidos en el medio ambiente por su carácter eco-tóxico para ambientes acuáticos, plantas y seres humanos. El 2,4-D presenta alta solubilidad en agua por lo que genera contaminación tanto en aguas superficiales como subterráneas por escorrentía poniendo en riesgo la salud del ecosistema

presente (Islam *et al.*, 2018). El estudio de Zabaloy, Garland & Gómez (2008) determinó que el uso intensivo de plaguicidas como el 2,4-D, metsulfouron-metil y glifosato pueden ocasionar cambios en la actividad microbiana del suelo y la densidad bacteriana por ende su fertilidad. Es así como se recalca la importancia de establecer planes de gestión ambiental referentes al adecuado control de las dosis, almacenaje y disposición final de los herbicidas para evitar potenciales impactos ambientales en cuerpos de agua y pérdida de fertilidad del suelo. Se insta a implementar normas de seguridad laboral para la protección de los trabajadores que aplican los herbicidas en finca para minimizar la exposición directa a químicos con potencial de riesgo a la salud humana.

5.2.3 Procesamiento de madera

La etapa de procesamiento de madera consiste en 3 subprocesos: aserradero, secado y secundario. El subproceso de aserradero constituye la primera fase de transformación de la troza corta para la obtención de listones de madera aserrada. Para el procesamiento de la troza en aserradero se utilizaron los datos de rendimientos y potencia de motores para la maquinaria de diámetro menor, debido a que la maquinaria mayoritariamente utilizada para troza corta. Por su parte, la fase de secado consiste en la preservación de la madera mediante la solución de ácido bórico y el secado para la obtención de listones con un porcentaje de humedad final del 10-12%. Seguidamente se realiza un proceso de pre-secado donde los listones de madera son preparados en paquetes para el embalaje con plástico lo que permite la mayor concentración y absorción de la solución bórica para proveer inmunidad a la madera. Finalmente, el secado de la madera se realiza con vapor mediante el aprovechamiento de los residuos generados en las fases de aserradero y secundario. Esta fase se compone de los procesos de calentamiento de las secadoras, secado, enfriamiento e igualamiento con una duración de 15-30 días y con una tolerancia en la diferencia del espesor de 2-3 mm por bache.

El proceso de secundario consiste en la transformación secundaria de la madera para la elaboración del Tablame Premium. La maquinaria utilizada es la re-aserradora, cepilladora doble para el lijado de la madera, despunte para la obtención de listones de largo de 15-25 cm, “finger-joint” para acoplar los listones con los adhesivos Poli acetato de Vinilo (PVA) y Emulsión de Polímero Isocianato (EPI) para la obtención del Tablame, la escuadradora para

dar las dimensiones requeridas, la moduladora para garantizar las líneas de cola, cepilladora doble para calibrar de manera uniforme el espesor y por último la prensadora con radio frecuencia para evitar la deslaminación. Para el embalaje se utiliza plástico para la preparación de los paquetes para el transporte al punto de venta. La información de los insumos, los rendimientos de procesamiento y las bases de datos utilizadas se encuentran en los Apéndices 1 y 6 respectivamente.

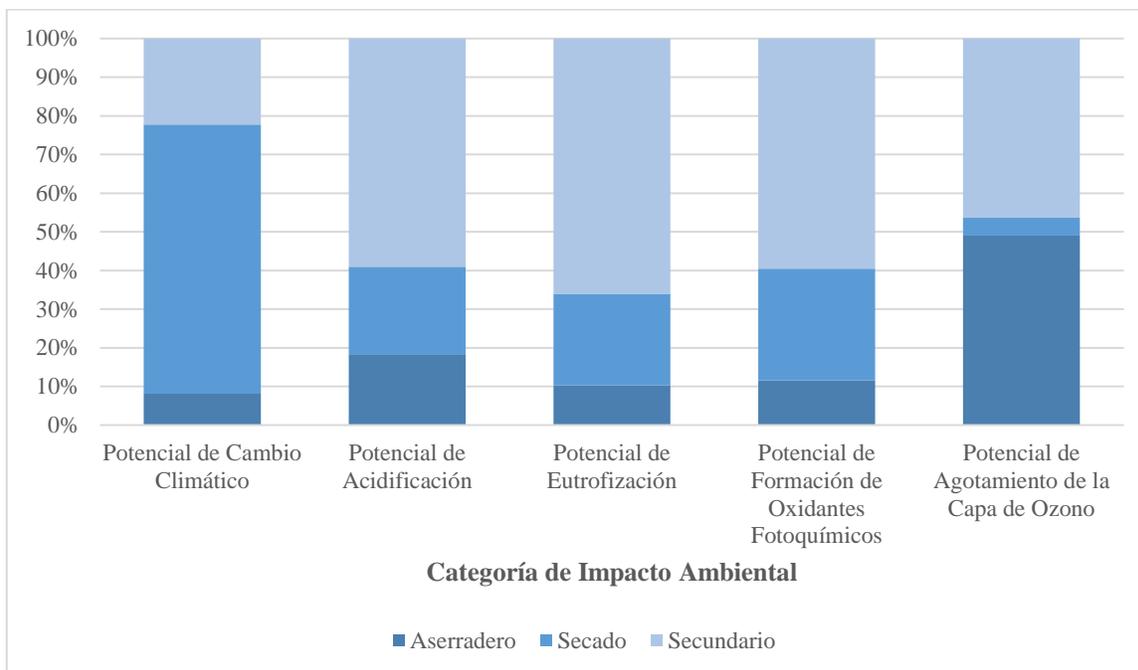


Figura 5-3. Evaluación del potencial impacto ambiental de la etapa de procesamiento de madera.

Al analizar la Figura 5-3, en la categoría de impacto ambiental de cambio climático el proceso de mayor contribución fue el secado con un 69,6%, seguido de la fase de secundario con un 22,2% y por último el aserradero con un porcentaje de 8,1%. Al generar el análisis de los eco puntos, se determinó que en el proceso de secado el mayor impacto ambiental en la huella de carbono se generó por el uso de los residuos de madera (aserrín) para la producción de vapor. Dicho resultado fue debido a las emisiones de CO₂ generadas por los residuos en la caldera. Según Martínez & Berdasco (2015), se generan emisiones de CO₂ y CH₄ contenidos en la madera por procesos de final de vida o combustión (uso energético), las cuales son proporcionales con la cantidad de carbono almacenado en la biomasa. Por la tanto, la fase de secado generó la mayor contribución a la huella de carbono consecuente a la liberación del carbono fijado en el aserrín debido al alto requerimiento del insumo para generar la cantidad

de vapor requerida para el secado del total del volumen de 459, 43 m³ de madera aserrada. La disminución del porcentaje de humedad inicial del 60-70% al 10-12%, requiere de producción 3,46 MJ requeridos por unidad funcional generando así una emisión de 4,91 kg CO₂ eq. Según Salles *et al.* (2018), el uso exclusivo de residuos de madera para la obtención del requerimiento calor en la planta representa la alternativa con menor impacto ambiental en las categorías de potencial de acidificación, eutrofización, cambio climático, formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento abiótico en comparación el uso de gas natural, diésel o mezcla de un combustible fósil con residuos de madera.

Para la fase de secundario, el 47,0% del potencial de cambio climático fue por el proceso productivo de las tarimas utilizadas en el embalaje del producto final, el 38,6% por el consumo de electricidad y el 11,5% por la producción del plástico de empaque. Se debe mencionar que las tarimas utilizadas para el embalaje son producidas en la industria de MCC con madera de rechazo, por lo que siguen los lineamientos de finca y procesamiento descritos para la elaboración de tablameles. Por consiguiente, se realizaron modificaciones en la base de datos de SimaPro para la entrada del insumo en referencia al cambio de la energía por la matriz costarricense, el uso de adhesivos a base de urea formaldehído y el transporte con la finalidad de obtener un insumo acorde con el proceso productivo de la empresa. Finalmente, en la fase de aserradero el uso de diésel en los cargadores de troza representó el 65,2% de la huella de carbono y el 34,7% restante por el consumo eléctrico.

Según el estudio de ACV de Salles *et al.* (2018), se determinó para el potencial de cambio climático que el uso de la resina de urea-formaldehído, el consumo eléctrico, principalmente por el uso de fuentes no renovables (petróleo y carbón) y la producción de calor por biomasa representan la contribución mayoritaria para la emisión de CO₂ eq, para la producción de tableros de madera en Brasil. Se destaca la similitud en comparación con el ACV realizado en el aporte al potencial de cambio climático por requerimiento energético, tanto de electricidad como biomasa; sin embargo, en el proceso de secundario no se obtuvo un aporte significativo por del uso de adhesivos. Esto se debió a que en el procesamiento de madera se utilizan adhesivos a base de agua y PVA y una emulsión de polímero-isocianato (EPI); evitando el impacto en la huella ambiental, principalmente en la categoría de ecotoxicidad y potencial de calentamiento global (Liu *et al.*, 2018).

En cuanto a las otras categorías de impacto ambiental, el procesamiento secundario resultó la fase de mayor potencial impacto ambiental con 59,2% de acidificación, 80,2% de eutrofización, 46,2% del potencial de agotamiento de la capa de ozono y un 61,9% de formación de oxidantes fotoquímicos. La fase de secado generó el 22,8% del potencial de acidificación, 28,8% del potencial de eutrofización, 4,6% del potencial de agotamiento de la capa de ozono y el 30,0% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Finalmente, el aserradero representó la fase con menor aporte al potencial de impacto ambiental significativo a la etapa de finca, exceptuando el potencial de agotamiento de la capa de ozono con un aporte del 48,9%. Dicho subproceso produjo el 18,2% del potencial de acidificación, 12,4% del potencial de eutrofización y el 12,0% del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos.

Con respecto al potencial de eutrofización, el uso intensivo de energía constituyó el principal aporte a dicha categoría por el consumo eléctrico para las fases de secundario y aserradero, además, de la producción de calor en caldera en secado y la producción de tarimas. De igual manera, el consumo energético representó la contribución mayoritaria a la huella de acidificación y el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos en la etapa de procesamiento de madera. A su vez, el uso de diésel para la maquinaria en aserradero, la producción de tarimas y el plástico de embalaje fueron insumos de mayor aporte en el potencial de acidificación para las fases de aserradero y secundario respectivamente. En el caso del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, la producción de las tarimas, plástico y gas LPG generaron un aporte de relevancia en el impacto ambiental. Según Moro *et al.* (2017), el consumo de electricidad y la producción de calor en la planta térmica fueron las entradas con mayor significancia en la generación de impactos ambientales en las categorías de acidificación, eutrofización, cambio climático, potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de recursos abióticos para la producción de paneles de madera. De manera similar, para el caso del ACV del Tablamel Premium se determinó que el uso intensivo energético para el procesamiento de madera representó el factor con mayor significancia en la generación de impactos ambientales potenciales para la totalidad de categorías en análisis.

Los resultados obtenidos para la etapa del ciclo de vida de procesamiento de madera fueron 6,87 kg CO₂ eq para cambio climático, 0,0057 kg SO₂ eq para acidificación, 0,00024 kg N eq para eutrofización y 0,0059 kg NMVOC para la formación de oxidantes fotoquímicos. La categoría de impacto ambiental de potencial de agotamiento de la capa de ozono no presentó un resultado de significancia debido a que su impacto ambiental potencial es menor al 1%, según lo establece la norma ISO 14044. Se determinó que el potencial de cambio climático es la categoría de mayor relevancia ambiental traducido en la mayor huella obtenida consecuente a las emisiones de GEI por combustión de biomasa y uso de energía eléctrica.

5.2.4 Transporte del tablamel premium a punto de venta

Para la etapa de distribución del tablamel premium se incluyó el transporte desde la industria en Santa Rosa de Pocosol al punto de venta en Río Segundo de Alajuela. Este transporte es realizado por camiones propios de la empresa una vez finalizada la orden de producción. La etapa de transporte se modeló en el programa SimaPro mediante las toneladas del producto terminado por el kilometraje total del recorrido de 137 km.

Los resultados para la fase de transporte a punto de venta fueron 0,0022 kg CO₂ eq para potencial de cambio climático, 0,000012 kg SO₂ eq para potencial de acidificación y 0,000018 kg NMVOC para el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos. Las categorías de impacto ambiental de eutrofización y potencial de agotamiento de la capa de ozono no presentaron un resultado de impacto ambiental de significancia. Los aportes a las categorías de impacto ambiental significativas son debidos la combustión del diésel y al ciclo de vida del camión.

5.2.5 Distribución del impacto ambiental en las etapas del ciclo de vida

La distribución del impacto ambiental en las etapas de producción de plántulas, finca, procesamiento de madera y transporte a sitio de ventas se muestran en la Figura 5-4.

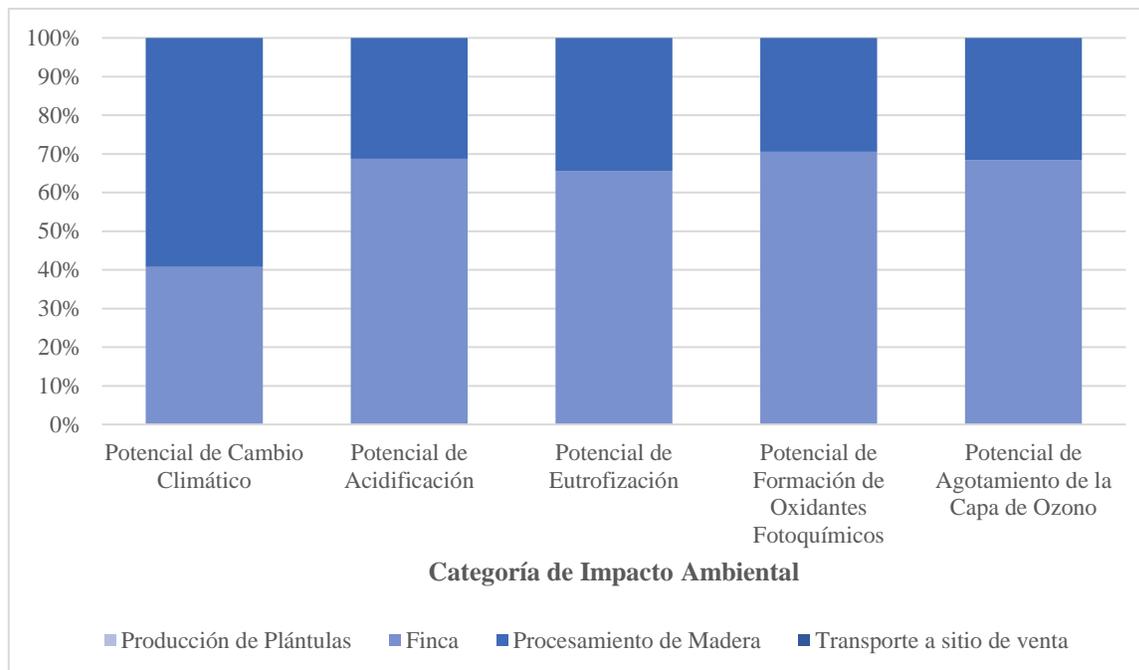


Figura 5-4. Evaluación del potencial impacto ambiental de un tablamel premium de MCC.

La etapa de producción de plántulas y transporte a punto de venta no presentaron un impacto ambiental significativo en comparación con las demás fases del ciclo de vida. Para la categoría de impacto ambiental de cambio climático, el 58,7% fue debido al procesamiento de madera, y el 40,3% por el proceso de finca. Según el análisis de eco puntos, el 45,3% de la huella de carbono fue por el uso de aserrín para la producción de vapor, el 16,4% por el fertilizante nitrogenado Revital en finca, el 13,9% por el uso de diésel en la fase de aserradero, el 7,8% por el uso del fertilizante Rafos y finalmente el 5,6% por el consumo eléctrico en el procesamiento de madera (Figura 5-5).

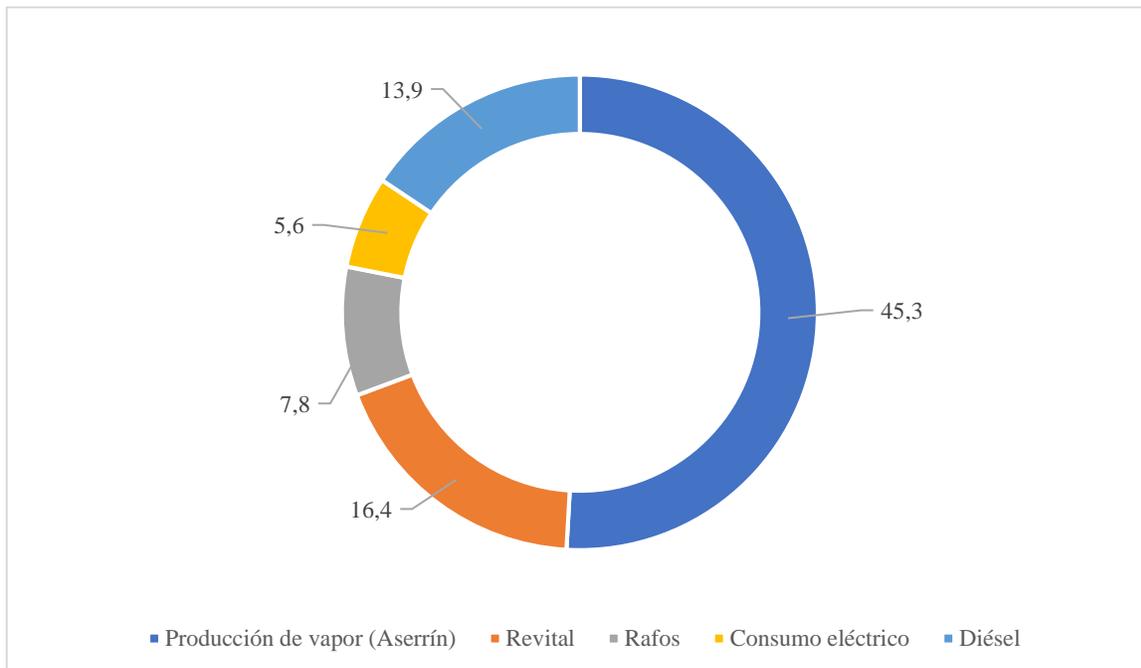


Figura 5-5. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de cambio climático.

En el caso de la categoría de potencial de acidificación, se obtuvieron resultados de aporte del 67,3% para la etapa de finca y un 30,6% para el procesamiento de madera. Para la totalidad del proceso, las principales fuentes de aporte a la huella de acidificación se debieron al uso de fertilizantes nitrogenados en finca, Revital y Rafos, con un 32,2% y 15,1% respectivamente, un 11,3% por el consumo eléctrico, 14,2% por uso de diésel en finca y procesamiento de madera, 6,5% por el uso de aserrín para producción de vapor, 4,75% por uso de cal dolomita y por último un 4,5% por la producción del plástico de embalaje (Figura 5-6).

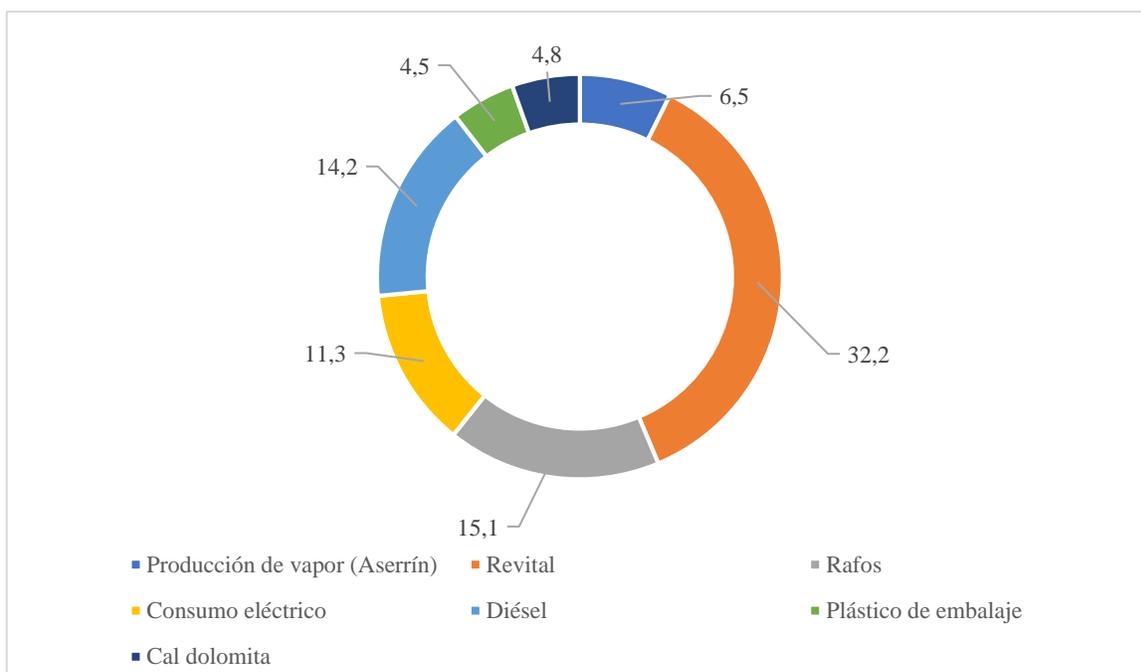


Figura 5-6. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de acidificación.

Para el potencial de eutrofización, se obtuvo un aporte del 73,1% de la fase de finca y un 23,1% del procesamiento de madera. El análisis de eco puntos determinó que el uso del fertilizante foliar Revital generó el mayor potencial de eutrofización con un 38,3% de la huella total para la producción del Tablamel Premium. Asimismo, los insumos y procesos con aporte significativo en la huella de eutrofización fueron el fertilizante Rafos con un 18,1% de contribución, cal dolomita con 7,6% (producción del óxido de magnesio), el oxifluorfen con 1,2% (tratamiento de los residuos del empaque), producción de vapor con aserrín con 7,3%, consumo eléctrico con 9,0% y finalmente el uso de diésel (finca e industria) con un 6,2% (Figura 5-7).

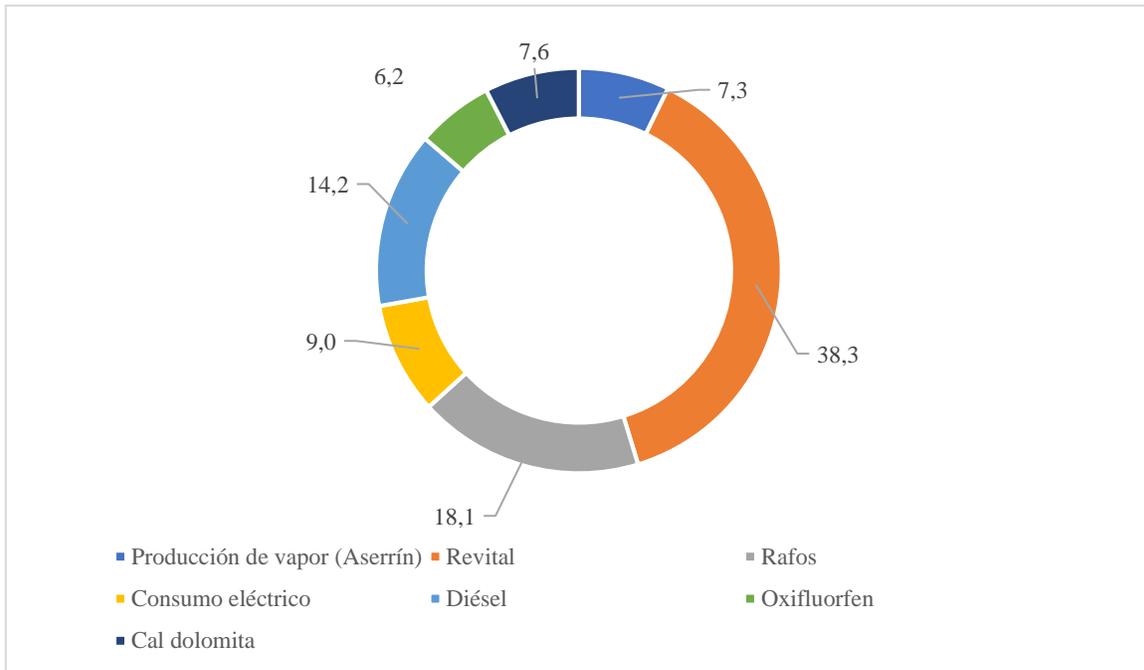


Figura 5-7. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de eutrofización.

Por su parte, el potencial de formación de oxidantes fotoquímicos fue consecuente al 57,2% del proceso de finca, y el 40,9% por el procesamiento de madera. Las fuentes con mayor impacto en dicha categoría con un aporte del 23,9% fueron por uso de Revital, 11,2% por requerimiento del fertilizante Rafos, 14,1% por consumo de diésel, 14,0% por la producción de calor con aserrín, 11,1% por consumo eléctrico, 7,8% por producción del plástico de embalaje, 5,7% por la elaboración de la cal dolomita y por último un 2,5% por la utilización del gas LPG en los montacargas en el procesamiento de madera.

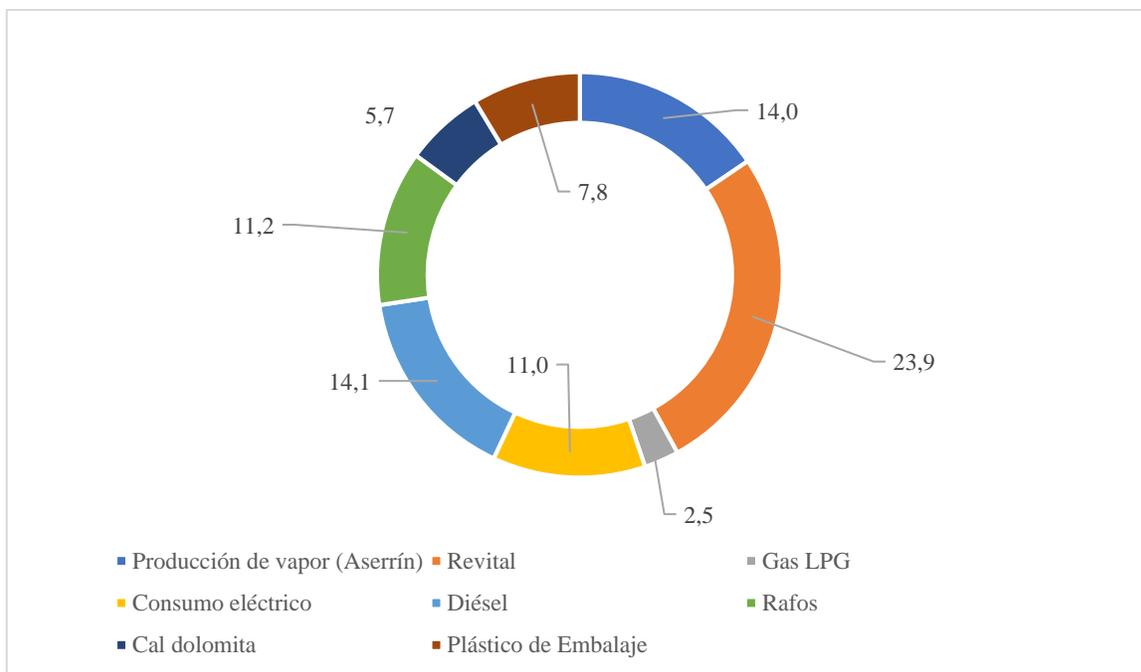


Figura 5-8. Composición de la categoría de impacto ambiental de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos.

Considerando los impactos ambientales obtenidos, se determinó que los procesos e insumos con mayor potencial de impacto ambiental fueron el uso de fertilizantes nitrogenados (Revital y Rafos), uso de diésel (finca y procesamiento de madera), consumo eléctrico y la producción de vapor mediante los residuos de aserrín. Por lo tanto, se destaca la importancia del establecimiento de medidas de gestión y uso de indicadores ambientales para el control en el consumo de fertilizantes, combustibles fósiles y consumo energético con la finalidad de generar una mayor eficiencia ambiental en la producción de tablameles.

Analizando las otras categorías de impacto ambiental, el agotamiento de los combustibles fósiles y la toxicidad humana fueron las dos categorías con mayor impacto después del potencial de cambio climático. Dichas categorías no se incluyeron dentro del método de cálculo de impacto ambiental debido a que no están estipuladas en la RCP seleccionada. Sin embargo, cabe señalar que la categoría de agotamiento de combustibles fósiles las fuentes principales de impacto correspondieron a la utilización de diésel, para actividades de preparación de terreno y cosecha final en finca y en la etapa de procesamiento de madera para cargar las trozas a la maquinaria de aserradero; además, el uso de combustibles fósiles para la producción de fertilizantes, mayoritariamente el insumo Revital. En el caso de la

categoría de toxicidad humana, el potencial impacto fue principalmente por la producción de insumos en finca por el uso de químicos como óxido de cobre, ácido nítrico, amonio y magnesio. Por lo tanto, el uso de Cobretane, Rafos, Revital y cal dolomita generaron una contribución significativa al potencial de toxicidad humana.

Según la unidad funcional, las limitaciones determinadas en la metodología y los métodos de evaluación de impacto ambiental, la DAP para la producción de un Tablame Premium se muestra en el Cuadro 5-2.

Cuadro 5-2. Resultados de la DAP para la producción de un Tablame Premium en MCC.

Indicador	Resultado	Unidad
Potencial de cambio climático	10,6	kg CO ₂ eq
Potencial de acidificación	0,016	kg SO ₂ eq
Potencial de eutrofización	0,00082	kg N eq
Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	0,011	kg NMVOC
Potencial de agotamiento de la capa de ozono	5,33 E-07	kg CFC-11 eq
Consumo total de energía primaria	Resultado	Unidad
No renovable, fósil	55,9	MJ
No renovable, nuclear	1,74	MJ
Renovable (solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica)	37,6	MJ
Renovable, biomasa	5,23	MJ
Consumo de recursos materiales	Resultado	Unidad
Agotamiento de agua	0,036	m ³

En base con el Cuadro 5-2, se determinó que el potencial de cambio climático constituyó la categoría de impacto ambiental más significativa en el estudio. A su vez, el potencial de agotamiento de la capa de ozono no generó un resultado de relevancia en términos de impacto ambiental ya que su aporte es menor al 1%. En referencia a la fijación de carbono en finca, no se incluyó el dato en la huella de carbono reportada debido a que la RCP seleccionada estipulada que solo se contempla el almacenamiento de CO₂ en el producto final cuando se

establece en los límites del sistema la etapa de final de vida. Se realizó el análisis de la categoría de potencial de cambio climático con el proceso de fijación de CO₂ con la finalidad de analizar la variación en la huella de carbono resultante. Para este caso, se obtuvo un resultado de -39,5 kg CO₂ eq para la categoría de impacto ambiental de cambio climático. Al realizar el balance de carbono para el alcance de cuna a puerta del estudio se obtiene un valor negativo de huella de carbono, lo que sugiere que la capacidad de fijación de CO₂ en biomasa en la fase finca es mayor al total de emisiones. Según Cortés (2016), el valor de 47,59 Mg ha⁻¹ (valor de referencia para el estudio) supera el acumulado en otras coberturas forestales como bosques secundarios y otros usos de suelo como sistemas agroforestales (SAF). Se debe destacar el mecanismo de compensación que provee las plantaciones forestales de madera para las emisiones de GEI debidas al proceso de producción del Tablamel. En adición, el uso de productos de madera permite un potencial de mitigación de cambio climático mediante el secuestro de carbono en la materia prima y la substitución de materiales alternativos (acero y concreto) por manejo sostenible de las plantaciones forestales (Prada *et al.*, 2016). A nivel de mercadeo, se debe enfatizar en los beneficios del uso de productos maderables en la huella de carbono como incentivo de compra de un producto con mayor sostenibilidad en el área de la construcción y fabricación de muebles.

Para el consumo total de energía primaria se obtuvo un resultado de 100,47 MJ para el ciclo de vida de producción del Tablamel, incluyendo los procesos de fabricación de materia prima. La matriz de consumo de energía primaria se compuso de 55,6% proveniente de fuentes fósiles, 37,4% renovable (solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica), 5,2% de biomasa y finalmente 1,7% de nuclear. El consumo mayoritario de energía fósil se debió al uso de combustibles fósiles en finca e industria y a la producción de insumos, principalmente químicos y adhesivos fuera de Costa Rica. Para la modelación de insumos, se utilizó la materia primaria de Row de manera que el programa SimaPro utiliza un promedio de matrices energéticas a nivel mundial, las cuales se destacan por el alto consumo de combustibles fósiles para la producción energética. La utilización de bases de datos para Row fue porque la mayoría de los insumos son producidos en países latinoamericanos (Colombia y México) y no existen bases de datos específicas para la región, lo que implica una limitación para representar de manera idónea la producción de insumos. Dicha limitante se atribuye a que no se utiliza la matriz energética, tipo de transporte y kilometraje, consumos energéticos,

proceso productivo, generación de emisiones y residuos sólidos específicos al país de origen. Por su parte, el 39,7% del consumo de energía primaria fue generado por fuentes renovables consecuentes al uso de la matriz energética costarricense y aserrín para el secado en el procesamiento de madera. Finalmente, el aporte de la energía nuclear se atribuyó de manera similar a la producción de insumos fuera del país.

Para la categoría de potencial de agotamiento de agua, la fuente principal del impacto con el 66,6% fue la etapa de finca y el 33,4% restante por el procesamiento de madera. Dicho resultado fue consecuente a la mayor utilización de agua en la fase de finca para la dilución de químicos con un consumo de 200 L/ha para las mezclas de insumos por cada aplicación de control químico y químicos pre emergentes en la preparación del terreno. En el caso del procesamiento de madera, el aporte fue debido a la utilización de agua para la mezcla con ácido bórico para el proceso de curado de la madera.

Para la obtención de la DAP, la información generada debe ser verificada por una tercera parte de acuerdo con la norma ISO 14025:2007 para asegurar la veracidad de los resultados obtenidos. El proceso de verificación queda fuera del estudio debido a que el alcance del estudio no contempla financiamiento y la finalidad de la realización acordado con la empresa MCC fue para evaluar el impacto ambiental del procesamiento de tablamel premium a nivel interno.

5.3 COMPARACIÓN DEL ACV REALIZADO CON OTROS ACV PARA PRODUCTOS DE MADERA

5.3.1 Comparación con el ACV para tablero DM en Brasil

En referencia a la comparación del ACV realizado para el Tablamel Premium con otros estudios para productos de madera, se tomó como referencia el estudio de Moro *et al.* (2017) para el ACV para el proceso productivo de un tablero de fibra de densidad media (DM) en Brasil. El objetivo de la comparación con otros estudios de ACV es la identificación de diferencias y similitudes en relación con los impactos ambientales obtenidos por el ciclo de vida del producto. Dicho estudio utilizó la metodología estipulada en las normas ISO 14040 e ISO 14044, donde se estableció 1 m³ de unidad funcional y un alcance de la cuna a la puerta. Para realizar la comparación se recalculó la unidad funcional del estudio a 1 m³ de Tablamel

Premium, los datos requeridos para el cálculo de entradas por etapa de ciclo de vida se muestran en el Cuadro 5-3.

Cuadro 5-3. Datos iniciales requeridos para la transformación de datos

Datos Iniciales	Valor	Unidad	Referencia
Hectáreas requeridas	0,019	ha/ m ³	Cálculo propio
Árboles requeridos por m ³	15,42	árbol/ m ³	Cálculo propio
Volumen de madera entrante a aserradero por m ³	3,4	m ³	Cálculo propio
Volumen de madera entrante a secundario por m ³	1,92	m ³	Cálculo propio
Cantidad de residuos de aserrín requeridos	51,0	kg	Cálculo propio

Las etapas del ciclo de vida para la comparación entre ambos estudios fueron las correspondientes a las actividades forestales para la obtención de materia prima y el procesamiento de madera. En el caso del Tablamel Premium, la etapa de operaciones forestales incluye las fases definidas de finca y producción de plántulas. El método de evaluación de impacto ambiental utilizado fue CML-IA baseline en concordancia con el estudio en Brasil. El Cuadro 5-4 muestra la comparación de los resultados obtenidos para las categorías de impacto ambiental en análisis para ambos estudios.

Cuadro 5-4. Comparación de resultados entre ambos estudios según la categoría de impacto ambiental

Categoría de Impacto Ambiental	Unidad	Resultados	
		Tablamel Premium	Tablero DM
Potencial de calentamiento global	kg CO ₂ eq	204	199
Potencial de acidificación	kg SO ₂ eq	0,29	1,59
Potencial de eutrofización	kg PO ₄ eq	0,081	0,29
Potencial de agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,08E-05	2,24E-05
Agotamiento de recursos abióticos	kg SB eq	0,00017	1,51

Al comparar los resultados descritos en el Cuadro 5-4, se determinó que solo en la categoría de potencial de calentamiento global se obtuvo un valor más alto. En el caso del Tablanel Premium el 40,3% de la huella de carbono fue por la etapa de operaciones forestales y el 58,7% restante por el procesamiento de madera. A diferencia del tablero DM donde el 5,7% del potencial de calentamiento global fue por los procesos de finca y el 94,3% por la producción del tablero. Se determinó que el uso de fertilizantes nitrogenados, principalmente Revital, en la etapa de finca generó la obtención de una huella de carbono mayor en comparación con el estudio en Brasil. Para el caso del tablero de DM se utilizó 0,9 kg/m³ de fertilizantes nitrogenados (urea y sulfato de amonio) y para el Tablanel Premium un total de 9,24 kg/m³. El uso intensivo de fertilizantes con altas concentraciones de nitrato de amonio constituye la fuente de mayor aporte de emisiones de GEI para la finca en el caso del Tablanel Premium, por ende, la obtención de un aporte de mayor significancia con respecto al proceso productivo del tablero DM.

Por su parte, el procesamiento de madera para el ACV en estudio produjo una huella de carbono menor que el tablero DM. Para el caso de MCC resultó una huella de 126,24 kg CO₂ eq y para el estudio en Brasil de 187,67 kg CO₂ eq. La mayor eficiencia ambiental para el procesamiento de madera se debe a que en el caso del estudio de Moro *et al.* (2017) las fuentes principales de impacto ambiental corresponden a la producción de energía eléctrica, uso de la resina de urea-formaldehído, consumo de gas natural en la planta térmica (procesos de secado) y el transporte de las trozas hacia la industria, factores de relevancia por su contribución al total de las categorías de impacto ambiental presentes en el Cuadro 5-4. La matriz eléctrica de Brasil se compone mayoritariamente de fuentes renovables (hidráulica, eólica, biomasa, solar, bagazo de caña), sin embargo, el 11% es por la utilización de derivados del petróleo como gas natural (De Jong *et al.*, 2016). La generación de electricidad es un factor clave para la emisión de gases de efecto invernadero y su impacto ambiental asociado, la producción de electricidad mediante el uso de derivados del petróleo genera un mayor impacto en contraste con fuentes renovables por emisiones directas de CO₂, NO_x y SO₂ en su operación (Turconi, Boldrin & Astrup, 2013). Por consiguiente, la matriz eléctrica costarricense que se caracteriza por la generación mediante fuentes renovables con un aporte

del 98,6% permite disminuir el impacto ambiental por emisión de GEI, debido a que el consumo eléctrico en industria es elevado por la numerosa cantidad de maquinaria requerida. Asimismo, el uso del adhesivo urea-formaldehído implicó un factor de significancia ambiental debido al proceso de producción de urea y metanol por emisión de metano, CO₂, óxidos de nitrógeno y SO₂, y la emisión de formaldehído por uso del adhesivo, por consecuente el adhesivo urea-formaldehído presenta impactos ambientales de consideración en las categorías de potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad y toxicidad humana (Lopes *et al.*, 2015). Según el análisis de eco-puntos, el uso de adhesivos PVA y EPI no generó un impacto ambiental de significancia por lo que se presenta un proceso de industria con mayor eficacia ambiental al comparar con el tablero DM, por características en la composición de insumos. En el caso del estudio en Brasil, para el proceso de secado en la planta térmica se utilizó gas natural y residuos de manera a diferencia del Tablamei Premium donde se usa únicamente aserrín y madera de rechazo, lo que atribuye una mayor huella de carbono en la producción por combustión y procesos de extracción del gas natural. Por lo tanto, en las categorías de impacto ambiental de acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de recursos abióticos se obtuvo un valor menor para el caso del Tablamei Premium por los factores mencionados anteriormente.

5.3.2 Comparación con otras DAP para productos de madera

Se realizó una comparación con cuatro DAP para productos de madera verificadas por la agencia FP Innovations con la utilización de la RCP utilizada en el estudio. Además, se comparó con un ACV de un tablero de madera en Brasil basado en la norma ISO 14025, ISO 14040 e ISO 14044. La unidad funcional definida para la totalidad de estudios en análisis fue 1 m³ de producto terminado. Para esta comparación se utilizaron los datos correspondientes al recalcu de la unidad funcional para ser congruente con los estudios y se adaptó el alcance mediante la inclusión de las etapas del ciclo de vida de operaciones forestales (producción de plántulas y finca) y procesamiento de madera. El método de evaluación de impacto ambiental seleccionado fue Recipe Midpoint (H).

Cuadro 5-5. Resultados de la DAP para 1 m³ de tablamel premium de MCC.

Indicador	Resultado	Operaciones Forestales	Procesamiento de Madera	Unidad
Potencial de cambio climático	206	84,4	126	kg CO ₂ e
Potencial de acidificación	0,28	0,20	0,088	kg SO ₂ e
Potencial de eutrofización	0,014	0,011	0,0035	kg N e
Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	0,20	0,12	0,083	kg NMVOC e
Potencial de agotamiento de la capa de ozono	0,00000	0,00000	0,00000	kg CFC-11 e
Consumo total de energía primaria	Resultado	Operaciones Forestales	Procesamiento de Madera	Unidad
No renovable, fósil	1110	715	393	MJ
No renovable, nuclear	32,1	13,5	18,6	MJ
Renovable (solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica)	588	10,81	577	MJ
Renovable, biomasa	102	5,81	96,3	MJ
Consumo de recursos materiales	Resultado	Operaciones Forestales	Procesamiento de Madera	Unidad
Agotamiento de agua	0,95	0,42	0,53	m ³

El Cuadro 5-6 se muestran los resultados obtenidos para analizar las similitudes y diferencias entre el estudio realizado y los demás estudios de ACV en productos de madera.

Cuadro 5-6. Comparación por aporte de etapa al potencial impacto ambiental con otros ACV de productos de madera.

Estudio	Autores	Resultados del Estudio				Resultados Propios				Existencia de similitud
		CC	A	E	FOF	CC	A	E	FOF	
Environmental aspects of oriented strands boards production: A Brazilian case study	Salle, Lopes, Rocco, Argenton & G3onzales-Garc3a	90,5% PM 9,4% OF	50,5% PM 49,5% OF	99,8% PM 0,2% OF	92,5% PM 7,5% OF	59,7% PM 40,3% OF	31,1% PM 68,9% OF	24,5% PM 75,5% OF	41,7% PM 58,3% OP	No hay similitud en t3rminos de porcentajes. Solo en la categor3a de CC existe similitud de que la fase de PM es de mayor impacto potencial.
Environmental Product Declaration Medium Density Fiberboard (MDF)	American Wood Council (AWC) Canadian Wood Council	82,8% PM 17,3% OF	90,2% PM 9,8% OF	85,6% PM 14,1% OF	83,1% PM 16,9% OF	59,7% PM 40,3% OF	31,1% PM 68,9% OF	24,5% PM 75,5% OF	41,7% PM 58,3% OP	Solo en la categor3a de CC existe similitud que en el PM es de mayor impacto. Se difiere en las dem3s categor3as de impacto.
Environmental Product Declaration North American Soft-wood Lumber	American Wood Council	85,5% PM 14,5% OF	87,1% PM 12,9% OF	62,3% PM 37,7% OF	80,4% PM 19,6% OF	59,7% PM 40,3% OF	31,1% PM 68,9% OF	24,5% PM 75,5% OF	41,7% PM 58,3% OP	No hay similitud en los porcentajes resultantes. Solo existe similitud en el aporte por etapa de PM en el potencial de cambio clim3tico.
Environmental Product Declaration Nordic Lam	Nordic Structures	89% PM 11% OF	92% A 8% OF	98% A 1% OF	96% PM 3% OF	59,7% PM 40,3% OF	31,1% PM 68,9% OF	24,5% PM 75,5% OF	41,7% PM 58,3% OP	Solo en la categor3a de CC existe similitud de que la fase de PM es de mayor impacto.
EPD North American Glued Laminated Timber	American Wood Council Canadian Wood Council	94,3% PM 5,74% OF	65,8% PM 34,2% OF	81,0% PM 19,0% OF	83,7% PM 16,4% OF	59,7% PM 40,3% OF	31,1% PM 68,9% OF	24,5% PM 75,5% OF	41,7% PM 58,3% OP	Solo en la categor3a de CC existe similitud por orden de etapas de impacto. No existe similitud en las otras categor3as de impacto.

Abreviaciones: PM: Procesamiento de Madera, OF: Operaciones Forestales, CC: Cambio clim3tico, A: Acidificaci3n, E: Eutrofizaci3n, FOF: Formaci3n de Oxidantes Fotoqu3micos.

El Cuadro 5-6 muestra que para la totalidad de estudios comparados presentaron similitud en cuanto a que la fase de procesamiento de madera representó la fase con mayor potencial de impacto ambiental para las categorías en análisis. Al comparar los resultados obtenidos, solo existió similitud en la categoría de cambio climático donde el procesamiento de madera constituyó en el mayor aporte a la huella de carbono. En las categorías de acidificación, eutrofización y potencial de formación de oxidantes fotoquímicos no hubo similitud con los estudios descritos, debido a que para el estudio del Tablamel la fase de operaciones forestales fue la que generó una mayor contribución a la huella ambiental en dichas categorías. Además, no hubo ningún estudio con similitud porcentual en los resultados por etapa para la totalidad de categorías de impacto ambiental, debido a que la fase de procesamiento de madera no generó un aporte tan elevado en contraste con la finca para el presente estudio. Se determinó que para el caso de la fase de operaciones forestales el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados implica el mayor aporte de impacto ambiental en comparación con otros ciclos de vida de productos de madera, exceptuando el potencial de cambio climático.

5.4 FIJACIÓN DE CARBONO EN EL PRODUCTO FINAL

En referencia al cálculo de la fijación de CO₂ en el producto final, se obtuvo un resultado de 41,43 kg CO₂ almacenados por unidad de Tablamel Premium para un total de 197,64 ton CO₂ fijados en la producción correspondiente al periodo fiscal 2016-2017. Se debe destacar la importancia de la producción de madera mediante planes de sostenibilidad ambiental en plantaciones forestales por su capacidad de constituir un reservorio de carbono en el producto final. Dicha característica permite crear una diferenciación en cuanto a la eficacia ambiental del tablamel en el mercado en comparación con otros productos utilizados para construcción o elaboración de muebles. El consumo de productos de madera es congruente con las estrategias sostenibilidad en construcción para propiciar tendencias de uso de materia prima bajos en emisiones de CO₂ como mecanismo de mitigación al cambio climático (Dodoo, Gustavsson & Sathre, 2011).

Por lo tanto, a nivel de mercadeo se debe destacar las características ambientales del producto final en términos de huella de carbono como forma de promoción de una estrategia ambiental

empresarial dirigido a un mercado enfocado en la construcción sostenible. Asimismo, es de relevancia fortalecer los planes y certificaciones a nivel de compras verdes y edificios sostenibles para generar un mayor posicionamiento en el mercado, por ende, un crecimiento en la demanda en productos de madera como forma de obtención de un menor impacto ambiental en sustitución con otros productos.

5.5 IDENTIFICACIÓN DE RETOS PARA EL DESARROLLO DE UNA DAP EN EL SECTOR FORESTAL

La primera entrevista realizada fue al ingeniero forestal Eddy Morales Corrales de la empresa Amanco. Según lo identificado en la entrevista, la empresa Amanco utiliza sistemas de certificación forestal como FSC y de baja emisión en pegamentos por política ambiental empresarial. La madera que utilizan con sistemas de certificación forestal es importada de Chile. La principal barrera que señaló para el uso de sistemas de certificación forestal es que actualmente el mercado no la solicita, por ende, hay poca competitividad de dichos productos ya que el consumidor prefiere un producto similar no certificado a un costo menor. A su vez, el ingeniero destacó que no se percibe un incentivo para el uso de certificaciones forestales por la desventaja a nivel de ventas del producto. Otra problemática señalada fue que el país no da abasto para la producción de madera para la demanda del mercado nacional y además los sistemas de gestión para la calidad, como INTECO, no son de carácter obligatorio en el país. Por lo tanto, la empresa Amanco prefiere la compra de madera de Chile ya que se obtiene un producto con certificado de calidad y adicionalmente con certificado de manejo sostenible de plantación. Asimismo, destacó la falta de conocimiento e interés por parte de ingenieros civiles y arquitectos para la selección de materiales de construcción sostenibles, donde se prefiere materiales como el gypsum por menor precio en el mercado. Otra barrera fue que el costo para la obtención de certificaciones ambientales es elevado y se traduce normalmente en un 8% adicional del precio del producto y ningún consumidor está dispuesto a asumir dicho costo. El experto no conoce el término de DAP y considera inviable la implementación en el país por falta de demanda en el mercado de eco-etiquetas ambientales para el sector de la construcción.

La segunda entrevista se realizó al ingeniero forestal Andrés Arguedas Chaverri que labora como consultor y regente forestal. El ingeniero señaló que la principal problemática para el

uso de certificaciones ambientales en el sector forestal es el alto costo de implementación sumado a que el sector forestal a nivel nacional está enfocado a la reducción de costos de producción por baja demanda del mercado. La baja rentabilidad de la producción de madera es generada por tendencia de compra a productos alternativos de menor costo, lo que también implica que mucha madera sea de origen ilegal. Otra problemática identificada es el proceso de carácter complejo para la trazabilidad de la madera por la cadena de custodia debido a la falta de interés y conocimiento en gestión ambiental para los sectores de producción primaria y secundaria. De manera similar, destacó que no se perciben incentivos a nivel económico por el uso de estas certificaciones. Además, el ingeniero no conoce el término de DAP y consideró que la promoción de edificios sostenibles representa un potencial mercado para la compra de madera eco-etiquetada; sin embargo, para el mercado actual no es viable en términos económicos el uso de DAP en el país.

La siguiente entrevista se realizó al gerente de ventas Geovanny López Alfaro de la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica, donde mencionó que MCC utilizó la certificación forestal FSC; sin embargo, no continuaron con la certificación consecuente al alto costo y nula demanda en el mercado nacional. La principal barrera identificada fue la desventaja a nivel económico de la implementación de sistemas de certificación ambiental; adicionalmente destaca que la demanda del mercado nacional de madera sólo se relaciona con certificaciones para la calidad. A su vez, consideró que el principal incentivo para la utilización de sistemas de certificación forestal es para madera de exportación en el mercado europeo a diferencia del nacional donde no se refleja ningún beneficio económico por la demanda del producto. Otra problemática señalada es que a nivel del sector de la construcción se prefieren materiales como hierro y cemento por lo que la demanda de madera para edificios sostenibles es incipiente en el mercado actual. De manera similar, el gerente de ventas no conoce el término de DAP y consideró que la principal barrera para el uso de eco-etiquetas para productos de madera es la elevada inversión para el inexistente beneficio económico obtenido.

La última entrevista se realizó al gerente de ventas Carlos Pérez Moreno del Depósito el Moreno, donde señaló que en la empresa utilizan madera con sistemas de certificación forestal como la FSC proveniente de Chile, Brasil, México y España. La principal barrera para el uso de sistemas de certificación forestal fue la inexistencia de mercado con tendencia

hacia la compra de productos sostenibles, por ende, no se percibe ningún incentivo para su uso. Asimismo, no conoce el término de DAP y consideró que el mercado actual no promueve la compra de madera con certificaciones de calidad ambiental, por ende, la inviabilidad económica para los productos de madera para su implementación.

La totalidad de personas entrevistadas concordaron que el uso de certificaciones para edificios sostenibles como LEED representa un potencial mercado para la compra de madera eco-etiquetada local a futuro. La información brindada en las entrevistas coincide con los retos identificados para las DAP en Costa Rica en el estudio de Lobo (2016) en el desconocimiento del eco-etiquetado en general por parte de los consumidores y alto costo para realizar el estudio. Según Jaung *et al.* (2016), el uso de certificaciones forestales implica un reto debido a que la demanda del mercado es insuficiente para el alto costo de adopción y el aumento de precio por desempeño ambiental es de carácter bajo, premisa que concuerda la situación evidenciada con no continuar con los procesos de renovación de la certificación FSC en el país. Para el caso del sector de la construcción, las barreras identificadas concuerdan con el estudio de Najjar *et al.* (2017) en referencia a la falta de interés en la aplicación de sistemas de gestión ambiental y la resistencia al cambio de tecnología para implementación de materiales de mayor sostenibilidad. Por lo tanto, se determinó que el principal reto para la implementación de eco-etiquetas para el sector forestal es la falta de mercado hacia tendencias de consumo con criterios ambientales, ya que el costo de asumir un proceso de certificación no se traduce en un beneficio económico para la empresa. Otros retos identificados son el alto costo del proceso de certificación, falta de interés de la aplicación de sistemas de gestión ambiental en el sector forestal y constructivo y la preferencia de materiales alternativos en construcción por menor costo.

6 CONCLUSIONES

- La ecoetiqueta para la producción de un Tablamel Premium en Maderas Cultivadas de Costa Rica mostraría la siguiente huella ambiental: 10,6 kg CO₂ de huella de carbono, 0,016 kg SO₂ eq de acidificación, 0,00082 kg N eq de eutrofización, 0,011 kg NMVOC de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, 5,33 E-07 kg CFC-11 eq de agotamiento de la capa de ozono, 0,036 m³ de huella hídrica y un consumo total de energía primaria de 100,47 MJ.
- La categoría de potencial de agotamiento de la capa de ozono no presentó un resultado significativo en el estudio debido a que el impacto ambiental potencial es menor al 1%.
- Las fases de producción de plántulas y transporte a punto de venta fueron insignificantes en términos de potencial impacto ambiental en comparación a las demás etapas.
- La etapa de procesamiento de madera representó la etapa con mayor impacto ambiental potencial de cambio climático con un porcentaje de contribución del 58,7%.
- La etapa de finca constituyó la etapa de mayor impacto ambiental en las categorías de acidificación, eutrofización y formación de oxidantes fotoquímicos por uso intensivo de fertilizantes nitrogenados.
- Las principales fuentes de impacto ambiental fueron el uso de fertilizantes nitrogenados, el consumo intensivo eléctrico, la producción de vapor con aserrín y el uso de diésel.
- El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados generó la obtención de una mayor huella de carbono en comparación con la producción de tableros en Brasil.
- La composición renovable de la matriz energética de Costa Rica, la utilización de adhesivos sin composición de urea-formaldehído y el uso exclusivo de residuos de madera para la producción de vapor resultaron en la obtención de un mejor desempeño en la huella ambiental de la fase de procesamiento de madera para el Tablamel Premium en comparación con el tablero DM de Brasil.
- Al comparar las categorías de impacto ambiental con otros ACV en madera se determinó que solo existe similitud en la categoría de potencial de cambio climático.

- No existió similitud en las categorías de acidificación, eutrofización y potencial de oxidantes fotoquímicos en la comparación con otros estudios de ACV por el aporte mayoritario de la fase de operaciones forestales del Tablamel Premium.
- Se obtuvo un resultado de 41,43 kg CO₂ fijadas por unidad de Tablamel Premium para un total de 197,64 ton CO₂ para la totalidad de producción en el periodo 2016-2017.
- La principal barrera identificada para la implementación del eco-etiquetado en el sector forestal es la falta de viabilidad económica por falta de mercado hacia productos de madera sostenible en el sector de la construcción.
- Otros retos identificados para el uso del eco-etiquetado fueron el alto costo del proceso de certificación, la falta de interés de la aplicación de sistemas de gestión ambiental en el sector forestal y constructivo y la preferencia de materiales alternativos en construcción de menor costo.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda volver a realizar la DAP cuando se obtenga la RCP específica para productos de madera en la construcción de alcance internacional del Internacional EDP System para concordar con los lineamientos y categorías de impacto establecidos.
- En el caso del desarrollo de una RCP a nivel regional, se recomienda la evaluación de las categorías de agotamiento de fuentes fósiles y toxicidad humana en la realización del ACV para el reporte de la huella ambiental.
- Se recomienda llevar un registro en la empresa en la etapa de finca para la trazabilidad adecuada de insumos y dosis referentes al control químico y preparación del terreno para generar resultados más acordes con el tipo de procesos presentes en el año de análisis.
- Para el caso de optar por la implementación de una DAP en Maderas Cultivadas de Costa Rica, se recomienda que se mida el consumo de electricidad en cada maquinaria con equipo especializado para obtener un dato real del consumo y no un cálculo aproximado, ya que el uso de electricidad constituye una fuente de significancia ambiental.
- Se recomienda contabilizar las emisiones por residuos de biomasa en finca para evaluar el balance de carbono obtenido en el proceso.
- En el proceso de finca, se recomienda la evaluación de las dosis requeridas de fertilizantes nitrogenados para generar una disminución en el consumo de estos o la sustitución parcial por fertilizantes con menor concentración de nitrato de amonio para mejorar el desempeño ambiental del proceso.
- En el procesamiento de madera, se recomienda el uso de indicadores de consumo energético, medidas de eficiencia energética y planes de mantenimiento preventivo y correctivo en la maquinaria.
- Se recomienda utilizar el dato de fijación de carbono por unidad de Tablame Premium como estrategia de mercadeo para la promoción de la obtención de un producto con mayor sostenibilidad en comparación con materiales alternativos.

- Se recomienda el uso de medidas de seguridad laboral y ambiental para la manipulación, almacenamiento y disposición final de químicos de carácter ecotóxico.
- Se recomienda realizar alianzas entre la industria de producción forestal y el sector de la construcción para la consolidación y promoción de productos de madera en el mercado para lograr mayor viabilidad económica en los sistemas de certificación forestal y eco-etiquetado ambiental.
- Para lograr una mayor incursión del eco-etiquetado en el sector forestal, se recomienda la creación de un sistema que permita calcular la huella ambiental del producto sin la utilización de programas de costo elevado para impulsar el interés del sector por este tipo de mecanismos de gestión ambiental.
- Se recomienda la creación de alianzas estratégicas entre productores de la industria forestal para la promoción de la fijación de carbono en plantaciones forestales de manejo sostenible y su potencial de compensación de emisiones para generar mayor competitividad en la demanda de productos de madera.
- A nivel del sector de la construcción sostenible, se recomienda implementar herramientas de ecodiseño y ACV en la fase de planeación de edificaciones para la selección de materiales para incrementar el uso de productos sostenibles como mecanismo de gestión ambiental.

8 REFERENCIAS

- Ahn, Y. Pearce, A. Wang, Y. & Wang, G. (2013). Drivers and barriers of sustainable design and construction: The perception of green building experience. *Internacional Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 4 (1), 35-45. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2012.759887>
- American Wood Council. (2015.) Environmental Product Declaration- North American Glued Laminated Timbers, 1-16.
- American Wood Council, & Canadian Wood Council. (2013). Environmental Product Declaration - North American Softwood Lumber, 1–15.
- American Wood Council, & Canadian Wood Council. (2013). Environmental Product Declaration - Medium Density Fiberboard, 1–17.
- Angelakoglou, K., & Gaidajis, G. (2015). A review of methods contributing to the assessment of the environmental sustainability of industrial systems. *Journal of Cleaner Production*, 108, 725–747. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.094>
- Bel, G., & Joseph, S. (2018). Climate change mitigation and the role of technological change: Impact on selected headline targets of Europe's 2020 climate and energy package. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 3798–3807. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.090>
- Bell, M. J., Hinton, N., Cloy, J. M., Topp, C. F. E., Rees, R. M., Cardenas, L., & Chadwick, D. R. (2015). Nitrous oxide emissions from fertilised UK arable soils: Fluxes, emission factors and mitigation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.003>
- Berardi, U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 8(2013), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.008>
- Cambria, D., & Pierangeli, D. (2012). Application of a life cycle assessment to walnut tree (*Juglans regia* L.) high quality wood production: A case study in southern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.031>
- Chappin, M. M. H., Cambré, B., Vermeulen, P. A. M., & Lozano, R. (2015). Internalizing sustainable practices: A configurational approach on sustainable forest management of the Dutch wood trade and timber industry. *Journal of Cleaner Production*, 107, 760–774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.087>
- Chen, J., & Innes, J. L. (2013). The implications of new forest tenure reforms and forestry property markets for sustainable forest management and forest certification in China. *Journal of Environmental Management*, 129, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.07.007>
- Conde García, M., Fernández-Golfín Seco, J.I.; Mier Pérez, R. (2013). Cálculo Del Consumo Calorífico En El Secado De La Madera. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Cortés, Y. (2016). Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una plantación de Gmelina arborea Roxb . Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Cubbage, F., Diaz, D., Yapura, P., & Dube, F. (2010). Impacts of forest management certification in Argentina and Chile. *Forest Policy and Economics*, 12(7), 497–504. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.06.004>
- Darko, A., Zhang, C., & Chan, A. P. C. (2017). Drivers for green building: A review of empirical studies. *Habitat International*, 60, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.12.007>
- De Jong, P., Kiperstok, A., Sánchez, A. S., Dargaville, R., & Torres, E. A. (2016). Integrating large scale wind power into the electricity grid in the Northeast of Brazil. *Energy*, 100, 401–415. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.026>
- De Lucía, C., Balena, P., Stufano, M., & Borri, D. (2016). Policy, entrepreneurship, creativity and sustainability: The case of ‘*Principi Attivi*’ (‘Active Ingredients’) in Apulia Region (southern Italy). *Journal of Cleaner Production*, 135, 1461-1473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.068>
- Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Diydata. (2010). Medium density fiberboard (MDF). *Penelitian Hasil Hutan*, 31, 120–140. Retrieved from www.diydata.com
- Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective. *Energy and Buildings*, 43, 1543-1597. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.002>
- Emanuelli, P., Milla, F., Duarte, E., Emanuelli, J., Jiménez, A., & Chavarría, M. I. (2015). Inventario Nacional Forestal de Costa Rica, 388.
- Espinoza, O., Buehlmann, U., & Smith, B. (2012). Forest certification and green building standards: Overview and use in the U.S. hardwood industry. *Journal of Cleaner Production*, 33, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.004>
- Ferro, F. S., Silva, D. A. L., Rocco Lahr, F. A., Argenton, M., & González-García, S. (2018). Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 183, 710–719. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.174>
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal .(2014). Desarrollo de un Modelo de Montos Diferenciados de PSA Considerando el Costo de Oportunidad Asociado al Uso de la Tierra ” INFORME FINAL, 91.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). *Global Forest Resources Assessment 2015. Desk reference. Desk Reference* (Vol. 2005). <https://doi.org/10.1002/2014GB005021>

- Galati, A., Gianguzzi, G., Tinervia, S., Crescimanno, M., & La Mela Veca, D. S. (2017). Motivations, adoption and impact of voluntary environmental certification in the Italian Forest based industry: The case of the FSC standard. *Forest Policy and Economics*, 83(July), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.08.002>
- Garcia, R., & Freire, F. (2014). Carbon footprint of particleboard: A comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *Journal of Cleaner Production*, 66, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.073>
- Garza-Reyes, J. A. (2015). Lean and green-a systematic review of the state of the art literature. *Journal of Cleaner Production*, 102, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.064>
- Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85(159), 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.08.007>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation. *A Life Cycle Impact ...*, 133. <https://doi.org/http://www.lcia-recipe.net>
- González-García, S., Feijoo, G., Heathcote, C., Kandelbauer, A., & Moreira, T. (2011). Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system. *Journal of Cleaner Production*, 19, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.10.016>
- González-García, S., García, R., Moreira, T., Gabarrell, X., Rieradecalli, J., Feijoo, G., & Murphy, R. (2012). Eco-innovation of a wooden childhood furniture set: An example of environmental solutions in the wood sector. *Science of Total Environment*, 426, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.077>
- Gou, Z., & Xie, X. (2017). Evolving green building: triple bottom line or regenerative design? *Journal of Cleaner Production*, 153, 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.077>
- Hasler, K., Bröring, S., Omta, S. W. F., & Olf, H. W. (2015). Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. *European Journal of Agronomy*, 69, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.001>
- Hektor, B., Backéus, S., & Andersson, K. (2016). Carbon balance for wood production from sustainably managed forests. *Biomass and Bioenergy*, 93, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.025>
- Estado de la Nación. (2017). Informe Estado de la Nación en Humano Sostenible 2017, Informe final “ Gestión de los recursos forestales en Costa Rica ,” 5–24.
- Estado de la Nación. (2015). Vigésimo Segundo Informe Humano Sostenible 2015, Informe final “ Gestión de los recursos forestales en Costa Rica ,” 1–27.

- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>
- Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in europe. *Sustainable Cities and Society*, 34(June), 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>
- Hojnik, J., & Ruzzier, M. (2017). Does it pay to be eco? The mediating role of competitive benefits and the effect of ISO14001. *European Management Journal*, 35(5), 581–594. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2017.07.008>
- Ingwersen, W. W., & Stevenson, M. J. (2012). Can we compare the environmental performance of this product to that one? An update on the development of product category rules and future challenges toward alignment. *Journal of Cleaner Production*, 24, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.040>
- INTE/ISO 14025:2007, “Etiquetas y declaraciones ambientales – Declaraciones ambientales tipo III – Principios y procedimientos”
- INTE/ISO 14040:2006, “Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Principios y marco de referencia”
- INTE/ISO 14044:2006, “Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Requisitos y directrices”
- Intergovernmental Panel for Climate Change. (2006). Forest land. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*, 4(2), 4.1-4.83. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2011.03.002>
- Iritani, D. R., Silva, D. A. L., Saavedra, Y. M. B., Graef, P. F. F., & Ometto, A. R. (2015). Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: A case study in a furniture industry. *Journal of Cleaner Production*, 96, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.029>
- Islam, F., Wang, J., Farooq, M. A., Khan, M. S. S., Xu, L., Zhu, J., ... Zhou, W. (2017). Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International*, 111(October 2017), 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020>
- Jaung, W., Putzel, L., Bull, G. Q., Guariguata, M. R., & Sumaila, U. R. (2016). Estimating demand for certification of forest ecosystem services: A choice experiment with Forest Stewardship Council certificate holders. *Ecosystem Services*, 22(November), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.016>
- Jaung, W., Putzel, L., Bull, G. Q., Kozak, R., & Elliott, C. (2016). Forest Stewardship Council certification for forest ecosystem services: An analysis of stakeholder adaptability. *Forest Policy and Economics*, 70(April), 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.004>

- Kellenberger, D., & Althaus, H. J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 44(4), 818–825. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.002>
- Kouchaki-Penchah, H., Sharifi, M., Mousazadeh, H., & Zarea-Hosseiniabadi, H. (2016). Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 112, 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.049>
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., & Warmiński, K. (2018). Life cycle assessment of Virginia mallow production with different fertilisation options. *Journal of Cleaner Production*, 177, 824–836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.275>
- Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2016). Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials (PCMs) for building applications: A review. *Journal of Building Engineering*, 6, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.008>
- Le Bellec, F., Velú, A., Fournier, P., Le Squin, S., Michels, T., Tendero, A., & Bockstaller, C. (2015). Helping farmers to reduce herbicide environmental impacts. *Ecological Indicators*, 54, 207–2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.020>
- Levasseur, A., Cavalett, O., Fuglestvedt, J. S., Gasser, T., Johansson, D. J. A., Jørgensen, S. V., & Cherubini, F. (2016). Enhancing life cycle impact assessment from climate science: Review of recent findings and recommendations for application to LCA. *Ecological Indicators*, 71, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.049>
- Liu, H., & Lin, B. (2016). Ecological indicators for green building construction. *Ecological Indicators*, 67, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.024>
- Liu, M., Wang, Y., Wu, Y., He, Z., & Wan, H. (2018). “Greener” adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. *Journal of Cleaner Production*, 187, 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.239>
- Liu, Z. Y., Li, C., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Cumulative energy demand and environmental impact in sustainable machining of inconel superalloy. *Journal of Cleaner Production*, 181, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.251>
- Lobo, M. (2017). Elaboración e Identificación de retos para una Declaración Ambiental de Producto en el café verde de Agrícola El Cántaro S.A. (tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Lohmeng, A., Sudasna, K., & Tondee, T. (2017). State of the Art of Green Building Standards and Certification System Development in Thailand. *Energy Procedia*, 138, 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.188>
- Lopes, D., Rocco, F., Donizeti, L., Christoforo, L., & Ometto, A. (2015). Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 96, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.007>

- Makkonen, M., Huttunen, S., Primmer, E., Repo, A., & Hildén, M. (2015). Policy coherence in climate change mitigation: an ecosystem service approach to forests as carbon sinks and bioenergy sources. *Forestry Policy and Economics*, 50, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2014.09.003>
- Mäkelä, M. (2017). Environmental impacts and aspects in the forest industry: What kind of picture do corporate environmental reports provide? *Forest Policy and Economics*, 80, 178-191. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.03.018>
- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., & Díaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, 36(4), 1900-1907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.026>
- Mantovani, A., Tarola, O., & Vergari, C. (2017). End-of-pipe or cleaner production? How to go green in presence of income inequality and pro-environmental behavior. *Journal of Cleaner Production*, 160, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.110>
- Martínez-Alonso, C., & Berdasco, L. (2015). Carbon footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* Mill. in the north of Spain. *Journal of Cleaner Production*, 102, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.004>
- Mastrucci, A., Marvuglia, A., Leopold, U., & Benetto, E. (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February), 316-332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.060>
- May, B., England, J. R., Raison, R. J., & Paul, K. I. (2012). Forest Ecology and Management Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests : Embodied energy , water use and other inputs. *Forest Ecology and Management*, 264, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.016>
- Minkov, N., Schneider, L., Lehmann, A., & Finkbeiner, M. (2015). Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: Status quo and practical challenges. *Journal of Cleaner Production*, 94, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.012>
- MINAE. (2017). Programa País Carbono Neutralidad 2.0: Categoría Organizacional.
- Moya, R., Muñoz, F., Salas, C., Berrocal, A., Leandro, L., & Esquivel, E. (2010). Tecnología de Madera de plantaciones forestales: Fichas Técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7, 87-100. ISBN: 978-9968-9643-3-3
- Moro, C., De Francisco, A., Mendes, L., Luiz, J., & Lopes, D. (2017). Life cycle assessment of medium-density particleboard (MDP) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>
- Najjar, M., Figueiredo, K., Palumbo, M., & Haddad, A. (2017). Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *Journal of Building Engineering*, 14(October), 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.10.005>

- Nordic Structures. (2013). Environmental Product Declaration: Nordic X-Lam. FP Innovations, 1–17.
- Oficina Nacional Forestal. (2017). Estadísticas 2016: Usos y aportes de la madera en Costa Rica. 10-16.
- Oficina Nacional Forestal. (2014). Utilice la madera para preservar el planeta.
- Organización de las Naciones Unidas. (2017). Objetivos del Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ostman, B., Brandon, D., & Frantzich, H. (2017). Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*, 91(April), 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>
- Piekarski, C. M., de Francisco, A. C., da Luz, L. M., Kovaleski, J. L., & Silva, D. A. L. (2017). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>
- Prada, M., Bravo, F., Berdasco, L., Canga, E., & Martínez-Alonso, C. (2016). Carbon sequestration for different management alternatives in sweet chestnut coppice in northern Spain. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1161–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.041>
- Ramos, A. R., Ferreira, J. C. E., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A., & Cherrafi, A. (2018). A lean and cleaner production benchmarking method for sustainability assessment: A study of manufacturing companies in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 177, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.145>
- Roche, L., Forrestal, P. J., Lanigan, G. J., Richards, K. G., Shaw, L. J., & Wall, D. P. (2016). Impact of fertiliser nitrogen formulation, and N stabilisers on nitrous oxide emissions in spring barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 233, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.031>
- Salles, F., Lopes, D., Rocco, F., Argenton, M., & González, G. (2018). Environmental aspects of oriented strands boards production. A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 183, 710–719. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.174>
- Schmidt Rivera, X. C., Bacenetti, J., Fusi, A., & Niero, M. (2017). The influence of fertiliser and pesticide emissions model on life cycle assessment of agricultural products: The case of Danish and Italian barley. *Science of the Total Environment*, 592, 745–757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.183>
- Skullestad, J. L., Bohne, R. A., & Lohne, J. (2016). High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives. *Energy Procedia*, 96(1876), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>
- Smyth, C., Rampley, G., Lemprière, T. C., Schwab, O., & Kurz, W. A. (2017). Estimating product and energy substitution benefits in national-scale mitigation analyses for Canada. *GCB Bioenergy*, 9(6), 1071–1084. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12389>

- Su, S., Li, X., Zhu, Y., & Lin, B. (2017). Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Energy and Buildings*, 149, 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042>
- Tecco, N., Baudino, C., Girgenti, V., & Peano, C. (2016). Innovation strategies in a fruit growers association impacts assessment by using combined LCA and s-LCA methodologies. *Science of the Total Environment*, 568, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.203>
- Turconi, R., Boldrin, A., & Thomas, A. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>
- Udvardi, M., Brodie, E., Riley, W., Kaeppler, S., & Lynch, J. (2015). Impacts of Agricultural Nitrogen on the Environment and Strategies to Reduce these Impacts. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.275>
- Valente, C., Spinelli, R., & Gunnar, B. (2011). LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 19, 1931-1938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.026>
- Van Bruggen, A., He, M., Shin, K., Mai, V., Jeong, K., Finckh, M., & Morris, J. (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate, 616-617, 255-268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.309>
- Van Kooten, G. C. (2018). The Challenge of Mitigating Climate Change through Forestry Activities: What Are the Rules of the Game? *Ecological Economics*, 146(June 2017), 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.002>
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, 135, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- Wang, X. H., Souders, C. L., Zhao, Y. H., & Martyniuk, C. J. (2018). Paraquat affects mitochondrial bioenergetics, dopamine system expression, and locomotor activity in zebrafish (Danio rerio). *Chemosphere*, 191, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.032>
- Wu, P., Xia, B., Pienaar, J., & Zhao, X. (2014). The past, present and future of carbon labelling for construction materials - A review. *Building and Environment*, 77, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.023>
- Wu, P., Song, Y., Shou, W. Chi, H., Chong, H. & Sutrisna, M. (2017). A comprehensive analysis of the credits obtained by LEED certified green buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68 (1), 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.007>

Zabaloy, M., Garland, J., & Gómez, M. (2008). An integrated approach to evaluate the impacts of the herbicides glyphosate, 2,4-D and metsulfuron-methyl on soil microbial communities in the Pampas region, Argentina. *Applied Soil Ecology*, 40, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.02.004>

APÉNDICES

APÉNDICE 1: DATOS DE INSUMOS DE MADERAS CULTIVADAS DE COSTA RICA

Cuadro A.1.1. Datos del paquete de fertilización de MCC para la etapa de producción de plántulas para el año 2016

Fase	Tiempo por Etapa	Tiempo de Aplicación	Fertilizante	Dosis por litro	Unidad	Dosis por Bomba (18 litros)	Unidad	
Jardín Clonal	-	3 veces por semana (foliar)	Mensual	Revital	75	g/árbol	-	-
			Solucat	15	g	270	g	
			Calcimax	13	cc	234	cc	
			Magmax	8	cc	144	cc	
			Bioactivante	6	cc	108	cc	
Enraizador	3 semanas	3 veces por semana (foliar)	Trichoderma	-	-	200	g	
			Solucat	15	g	270	g	
			Calcimax	13	cc	234	cc	
			Magmax	8	cc	144	cc	
			Trichoderma	-	g	200	g	
Aclimatación	2 semanas	3 veces por semana (foliar)	Solucat	15	g	270	g	
			Calcimax	13	cc	234	cc	
			Magmax	8	cc	144	cc	
			Bioactivante	6	cc	108	cc	
			Trichoderma	-	-	200	g	
Campo	1 semana	3 veces por semana (foliar)	Solucat	15	g	270	g	
			Calcimax	13	cc	234	cc	
			Magmax	8	cc	144	cc	
			Trichoderma	-	-	200	g	

Cuadro A.1.2. Datos de la dosis de fertilizantes y herbicidas de MCC para la etapa de finca para el año 2016

Fase	Insumo	Dosis
Preparación del terreno	Gallo	12 g/ha
	Crosser	0,25 L/ha
	Oxiflu 24 EC	2 L/ha
	Roundup	0,5 L/ha
Plantación	Cal dolomita	1 kg/árbol
	Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	1,5-3 ton/ha
Primera Fertilización	Rafos	150 g/árbol
	Revital	150 g/árbol
Segunda Fertilización	Rafos	150 g/árbol
	Revital	150 g/árbol
Primer Control Químico	Metsulfuron	20 g/ha
Segundo Control Químico	Gallo	12 g/ha
	Crosser	0,25 L/ha
	Roundup	0,5 L/ha
	Sulfato de Amonio	10 g/ha
Tercer Control Químico	Gallo	12 g/ha
	Gramuxon	1,5 L/ha

Cuadro A.1.3 Datos de insumos de MCC en la etapa de procesamiento de madera

Etapa	Insumo	Cantidad	Unidad	Cantidad por unidad funcional	Unidad
Secado	Ácido Bórico Granular	122,98	kg	0,013	kg
	Plástico	41	Rollos	0,0091	kg
Secundario	Adhesivo PVA	838,56	Kg	0,1758	Kg
	Adhesivo EPI	56,76	Kg	0,0127	Kg
	Plástico Embalaje	19	Rollos	0,063	Kg

Cuadro A.1.4. Datos de maquinaria utilizada en los procesos de aserradero y secundario

Fase	Código	Tipo de Maquinaria	Capacidad de motores (HP)
Secundario	SC01	Weining	65
	SC03	Sistema aspirador weining	25
	SC02	Molduradora 2	47,5
	SC04	Sistema aspirador molduradora 2	20
	SD01	Prensa radiofrecuencia	30
	SD05	Mesa entrada a la prensa	0,5
	SD04	Encoladora	1
	SD09	Prensa radiofrecuencia 2	5

Continuación del Cuadro A.1.4.

Fase	Código	Tipo de Maquinaria	Capacidad de motores (HP)	
Secundario	SD02	Escuadradora	4	
	SD06	Sistema aspirador escuadradora	20	
	SD03	Calibradora	117	
	SD07	Sistema aspirador lijadora	20	
	SE01	Compresor	30	
Aserradero	AF01	Astillador	150	
	AF04	Banda principal	3	
	AF05	Clasificador de aserrín	3	
	AA01	Recanteadora	30	
		Motor de avance	5	
	AA02	Recuperadora	40	
		Motor de avance	3	
	AA03	Mesa entrada	5	
	AA04	Banda de salida	3	
	AA05	Mesa de entrada	3	
	AA06	Banda aserrín recanteadora	3	
	AA11	Banda de aserrín recuperadora	3	
	AA12	Banda de aserrín	3	
		Superior izquierdo	25	
	AB01		Superior derecho	25
			Inferior izquierdo	30
			Inferior derecho	30
			Múltiple reaserradero superior	60
	AB02	Múltiple reaserradero inferior	100	
		Motor de avance	5	
	AB03	Entrada a menores	7,5	
	AB04	Unitizador	3	
		Bomba hidráulica	10	
	AB03	Motor de avance	3	
	AB06	Mesa salida de menores	7,5	
	AB07	Entrada a la múltiple	5	
	AB08	Salida de múltiple	3	
	AB09	Impulsadora de múltiple	3	
	AF06	Banda de aserrín debajo de clasificador	3	
	AF08	Motor	5	
	Motor	7,5		
	Banda entrada al astillador	3		
AF09	Banda de salida al astillador	3		
AF12	Banda del Cajón	3		
AF13	Banda de ascenso	3		
AF14	Banda de silo	7,5		
AF15	Banda de aserrín desviación	5		

Continuación del Cuadro A.1.4

Fase	Código	Tipo de Maquinaria	Capacidad de Motores (HP)
Aserradero	AE01	Reductor de avance	10
	AE02	Avance	3
		Motor izquierdo	3

Cuadro A.1.5 Datos de producción para las órdenes de Tablameles Premium para el periodo fiscal 2016-2017

Fecha Terminada	Número de Orden	Total Tablamele (PMT)	Rendimiento (%)	Total Horas Mano de obra	PMT/Unidad
15/10/2016	OP_0038580	4993,44	87	288	24,72
04/11/2016	OP_0038815	5908,08	82	102	24,72
02/12/2016	OP_0038955	11346,48	83	102	24,72
12/12/2016	OP_0039295	2397,84	82	102	24,72
23/01/2017	OP_0039595	2076,48	86	90	24,72
02/02/2017	OP_0039711	4523,76	81	72	24,72
22/02/2017	OP_0040207	5240,64	86	130	24,72
03/03/2017	OP_0040208	12928,56	87	150	24,72
07/04/2017	OP_0040779	7144,08	82	102	24,72
19/04/2017	OP_0040780	4894,56	86	140	24,72
25/04/2017	OP_0040858	3065,28	82	150	24,72
18/05/2017	OP_0040999	4078,80	82	150	24,72
18/05/2017	OP_0041125	2793,36	88	96	24,72
05/06/2017	OP_0041215	7737,36	82	258	24,72
23/06/2017	OP_0041396	6303,60	87	288	24,72
17/07/2017	OP_0041598	7069,92	81	192	24,72
04/08/2017	OP_0041710	3559,68	80	102	24,72
04/08/2017	OP_0041765	4029,36	83	102	24,72
25/08/2017	OP_0041972	3238,32	86	102	24,72
05/09/2017	OP_0042007	5611,44	82	156	24,72
13/09/2017	OP_0042048	5611,44	82	132	24,72
21/09/2017	OP_0042178	3361,92	83	72	24,72

APÉNDICE 2: CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LOS FERTILIZANTES

Utilizando la ecuación:

$$CO_2e = F_{sn} * FE * \left(\frac{44}{28}\right) * (GWP N_2O)$$

Dónde:

CO₂e: Emisiones equivalentes al CO₂

F_{sn}: kg de nitrógeno en fertilizantes por unidad de Tablamel

FE: Factor de Emisión según IPCC

GWP N₂O: Potencial de calentamiento global del N₂O

$$CO_2e = 0,190 * 0,01 * \left(\frac{44}{28}\right) * (310)$$

$$CO_2e = 0,93 \text{ kg/unidad de tablamel}$$

APÉNDICE 3: CÁLCULO DE LA ELECTRICIDAD EN EL PROCESAMIENTO DE MADERA

Se asumió un valor de eficiencia esperada del 70-80% según la capacidad del motor y un porcentaje de carga del 75% para la totalidad de la maquinaria. Para el cálculo del consumo eléctrico (kWh) por maquinaria de entrada se utilizaron las ecuaciones:

$$Potencia de entrada (W) = Capacidad del motor (HP) * 746 * 0,80 * 0,75$$

$$Consumo eléctrico(kWh) = \frac{Potencia de entrada (W) * Horas de consumo (hr)}{1000}$$

Muestra de cálculo para el astillador de la etapa de aserradero

$$Potencia de entrada = 150 \text{ HP} * 746 * 0,80 * 0,75$$

$$Potencia\ de\ entrada = 67140\ W$$

$$Consumo\ el\u00e9ctrico = \frac{67140\ W * 0,0036\ hrs}{1000}$$

$$Consumo\ el\u00e9ctrico = 0,24\ kWh$$

AP\u00c9NDICE 4: C\u00c1LCULO DE LA ENERG\u00cdA PRODUCIDA POR EL ASERR\u00cdN

Utilizando la ecuaci\u00f3n:

$$Poder\ cal\u00f3rico\ neto\ \left(\frac{kJ}{m^3}\right) = PC_{bruto} * \frac{(1 - \%H)}{100} * Densidad\ (kg/m^3)$$

Donde:

PC_{bruto}: Poder cal\u00f3rico bruto (kJ/m³)

%H: Porcentaje de Humedad

$$Poder\ cal\u00f3rico\ neto = 15687\ \frac{kJ}{m^3} * \frac{(1 - 10)}{100} * 430\ kg/m^3$$

$$Poder\ cal\u00f3rico\ neto = 6,07\ E05\ kJ/m^3$$

APÉNDICE 5: CARACTERÍSTICAS DE LOS INSUMOS SEGÚN ETAPAS DEL PROCESO

Cuadro A.6.1. Cantidad de insumos utilizados por unidad de Tablamel Premium para las etapas de producción de plántulas y finca

Etapa	Insumo	Tipo de producto	Cantidad	Unidad	Ingrediente Activo	% Ingrediente Activo	Concentración	Densidad (kg/L)	Cantidad de insumo por unidad de tablamel	Unidad
Producción Plántulas	Amonio Cuaternario	Bactericida-Fungicida	6,3	L	Amonio	75	p/v	1,2	0,000021	L
	Bioactive	Bioestimulante orgánico fertilizante	17,50	L	Extracto de cultivo microbial	1,1	p/v	1,10	0,000059	L
					Mezcla de enzimas y aminoácidos	1,0	p/v			
					Estimulador de crecimiento (Citoquinina)	0,1	p/v			
	Calcimax	Fertilizante Foliar	40,72	L	Calcio (CaO)	14,30	p/v	1,24	0,00014	L
					Boro (B)	0,64	p/v			
	Magmax	Fertilizante Foliar	25,05	L	Magnesio (MgO)	12,80	p/v	1,0	0,000084	L
					Boro (B)	0,65	p/v			
	Raddix	Fertilizante orgánico-mineral	0,10	kg	Nitrógeno (N)	1,6	p/v	-	0,00000035	kg
					Fósforo (P2O5)	1,32	p/v			
					Magnesio (MgO)	0,034	p/v			
					Calcio (CaO)	0,55	p/v			
					Boro (B)	0,26	p/v			
					Azufre (S)	0,1	p/v			
Zinc (Zn)					0,16	p/v				
Hierro (Fe)					0,1	p/v				
Cobre (Cu)	0,05	p/v								
Manganeso (Mn)	0,03	p/v								

Continuación Cuadro A.6.1

Etapas	Insumo	Tipo de producto	Cantidad	Unidad	Ingrediente Activo	% Ingrediente Activo	Concentración	Densidad (kg/L)	Cantidad de insumo por unidad de tablamel	Unidad
Producción de Plántulas	Revital	Fertilizante Foliar	2589,60	kg	Nitrato de Amonio (NH ₄ NO ₃)	45	p/p	-	0,009	kg
					Cloruro de Potasio (KCl)	30	p/p			
					Tetra borato disódico, pentahidratado	1,0	p/p			
	Trichoderma	Biofertilizante	34,80	kg	Nitrógeno (N)	1,10	p/p	-	0,00012	kg
					Calcio (CaO)	1,5	p/p			
					Magnesio (MgO)	18,7	p/p			
Sílice (Si)					39,5	p/p				
		Trichoderma harzianum 1,0 x10 ⁹ espora/g	20	p/p						
20 20 20 (Solucat)	Abono Soluble NPK	46,98	kg	Nitrógeno (N)	20	p/v	-	0,00016	kg	
				Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	20	p/v				
				Óxido de Potasio (K ₂ O)	20	p/v				
Aceite Lubricante	Lubricante	598,95	L	Aceite Mineral	98	p/p	0,88	0,0020	L	
Aceite de 2 (Relleno)	Lubricante	2,11	Gal	Disolvente Refinado Liviano	98	p/p	0,899	0,0071	L	
Finca	Cal Dolomita	Preparación de terreno	262,28	ton	Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	50	p/p	-	0,88	kg
					Carbonato de Magnesio (MgCO ₃)	40	p/p			
	Carbonato de Calcio	Preparación del terreno	712,01	ton	Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	98	p/p	-	2,39	kg
	Cobretane	Bactericida-Fungicida	189,87	kg	Manganeso etileno (ditiocarbamato) polímero	50	p/p	-	0,00064	kg
					Óxido de Cobre (CuO)	11,1	p/p			
Crosser	Herbicida	118,67	L	2-(4- diclorophenoxy) ácido acético	60	p/v	1,072	0,00040	L	

Continuación del Cuadro A.6.1

Etapas	Insumo	Tipo de producto	Cantidad	Unidad	Ingrediente Activo	% Ingrediente Activo	Concentración	Densidad (kg/L)	Cantidad de insumo por unidad de tablamel	Unidad
Finca	Gallo	Herbicida	7,59	kg	2-(4-methoxy-6-metil-1,3,5-triazina-2-carbomoi sulfonill) ácido benzoico	60	p/p	-	0,000026	kg
	Glisofato (Roundup)	Herbicida	237,34	L	Glisofato	35,6	p/v	1,7	0,00080	L
	Gramoxone	Herbicida	237,34	L	1,1'-dimetil-4,4'-bipiridilo	20	p/v	1,25	0,00080	L
	Pintura Blanca	-	314,75	gal	Solvente a base de agua	43	p/v	1,27	0,004	L
	Metsulforon	Herbicida	6,33	kg	2-(4-methoxy-6-metil-1,3,5-triazina-2-carbomoi sulfonill) ácido benzoico	60	p/p	-	0,000021	kg
	Oxiflu	Herbicida	632,90	L	Oxifluorfen	24	p/v	1,13	0,0021	L
	Rafos	Fertilizante foliar	78684,00	kg	Nitrato de Amonio (NH4NO3)	25	p/p	-	0,26	kg
					Cloruro de Potasio (KCl)	25	p/p			
					Tetraborato disódico, pentahidratado	0,2	p/p			
	Revital	Fertilizante foliar	78684,00	kg	Nitrato de Amonio (NH4NO3)	45	p/p	-	0,26	kg
					Cloruro de Potasio (KCl)	30	p/p			
					Tetraborato disódico, pentahidratado	1,0	p/p			
	Sulfato de Amonio	Fertilizante Foliar	1,58	kg	Sulfato de Amonio (NH4)2SO4	24	p/p	-	0,0000053	kg
Secado	Ácido Bórico Granular		122,98	kg	Ácido Bórico	99,9	p/p	-	0,013	kg

Cuadro A.6.3. Consumo de energía por unidad de tablamel por etapa del procesamiento de madera

Etapa	Consumo de energía	Unidad	Consumo de energía por unidad de tablamel	Unidad
Aserradero	7688,4	kWh	1,72	kWh
Secado	15466,2	MJ	3,46	MJ
Secundario	32094,60	kWh	7,18	kWh

Cuadro A.6.4. Consumo de combustibles fósiles por unidad de tablamel por fase del ciclo de vida

Etapa	Tipo de combustible fósil	Consumo Total	Unidad	Consumo (L/unidad de tablamel)
Finca	Diesel	107,52	gal	0,36
	Gasolina	17,87	gal	0,06
Procesamiento de madera	Diesel	536	L	0,12
	Gas LPG	524	L	0,11

Cuadro A.6.5. Aproximación de los pesos de los materiales de empaque de cada insumo según la etapa del ciclo de vida

Proceso	Insumo	Cantidad de Producto	Unidad	Tamaño de presentación	Unidad	Cantidad de recipientes	Material del envase	Peso del envase (kg)	Peso total del envasado (kg)
Producción de Plántulas	Amonio Cuaternario	6,30	L	3,5	L	-	PEAD	0,40	-
	Bioactive	17,50	L	3,19	L	5	PEAD	0,40	2,00
	Calcimax	40,72	L	3,5	L	42	PEAD	0,40	16,80
	Magmax	25,05	L	3,5	L	26	PEAD	0,40	3,34
	Raddix	0,10	kg	5	kg	-	PE-LD	0,20	-
	Revital	2589,6	kg	45	kg	438	PE-LD	0,22	96,36
	Trichoderma	34,80	kg	100	g	1248	Aluminio	0,008	9,84
	20 20 20 (Solucat)	46,98	kg	25	kg	7	PE-LD	0,18	1,26
Finca	Aceite Lubricante	598,95	L	1	L	599	PE-LD	0,06	35,94
	Aceite de 2 (Relleno)	562,32	L	1	L	562	PE-LD	0,06	33,72
	Cal Dolomita	262280	kg	50	kg	5253	PE-LD	0,24	1260,72
	Carbonato de Calcio	712012,50	kg	50	kg	14240	PE-LD	0,24	3417,60
	Cobretane	189,87	kg	1	Kg	190	Aluminio	0,02	3,8
	Crosser	118,67	L	3,5	L	34	PEAD	0,40	13,6
	Gallo	7,59	kg	10	g	175,9	Aluminio	0,005	0,88
	Glisofato (Roundup)	237,34	L	3,5	L	68	PEAD	0,20	13,6
	Gramoxone	237,34	L	3,5	L	68	PEAD	0,20	13,6
	Metsulfuoron	6,33	kg	10	g	63	Aluminio	0,005	0,315

Continuación del Cuadro A.6.5

Proceso	Insumo	Cantidad de Producto	Unidad	Tamaño de presentación	Unidad	Cantidad de recipientes	Material del envase	Peso del envase (kg)	Peso total del envasado (kg)
Finca	Pintura blanca	316,46	gal	1	gal	316	Aluminio	0,350	110,60
	Oxiflu	632,90	L	3,5	L	181	PEAD	0,40	72,40
	Rafos	78684,00	kg	45	kg	876	PE-LD	0,22	192,72
	Revital	78684,00	kg	45	kg	876	PE-LD	0,22	192,72
	Sulfato de amonio	1,58	kg	25	kg	-	PE-LD	0,12	-
Procesamiento de Madera	Ácido bórico	122,94	kg	25	kg	5	PE-LD	0,12	0,60
	Adhesivo ADEPI	838,57	L	1	gal	222	PEAD	0,50	111,00
							Aluminio	1,2	266,4
	Adhesivo ADHEPI	60,58	L	1	gal	16	PEAD	0,50	8,00
							Aluminio	1,2	19,2
	Plástico Embalaje	196762,50	pie ²	1650	pie ² /rollo	119	Cartón	0,20	23,85
Plástico Secado	67641,2042	pie ²	1650	pie ² /rollo	41	Cartón	0,20	8,2	

Cuadro A.6.6. Aproximación de las distancias recorridas desde la fabricación hasta MCC de los insumos

Proceso	Insumo	Proveedor	Cantidad (ton)	Distancia fabricación a puerto (km)	Distancia Puerto a Puerto (km)	Distancia Puerto a Distribución (km)	Distancia Distribuidor #1 a Distribuidor #2	Distancia Fabricación a Distribución (km)	Distancia Distribución a MCC (km)	TKM Camión	TKM Barco	TKM Total
Producción de Plántulas	Amonio Cuaternario	Corporación Química JyJ	2,12E-08	-	-	-	-	13,8	138	3,22E-06	-	3,22E-06
	Bandejas	HidroPlant	0,26	-	-	-	-	119	1,8	31,41	-	31,41
	Bioactive	Nutrientes y Fertilizantes S.A.	6,49E-08	-	-	-	-	129,0	22,8	9,85E-06	-	9,85E-06
	Calcimax	NutriAg	1,74E-7	811	5806	190	-	-	22,8	1,77E-04	1,01E-03	1,19E-03
	Magmax	NutriAg	8,40E-08	811	5806	190	-	-	22,8	8,60E-05	4,88E-04	5,74E-04
	Papel Periodico	Mujeres Ambinetalias de Florencia	0,0047	-	-	-	-	-	52,5	0,25	-	0,25
	Raddix	Cosmo Agro S.A.	3,52E-10	156	1144,5	153	-	-	155	1,63E-07	4,04E-07	5,67E-07
	Trichoderma	ORIOUS Colombia	1,20E-07	611	1144,5	112	-	-	22,8	8,95E-05	1,37E-04	2,27E-04
	20 20 20 (Solucat)	Atlántica Agrícola	1,6E-0	-	-	-	-	108	22,8	2,09E-05	-	2,09E-05

Continuación del Cuadro A.6.6

Proceso	Insumo	Proveedor	Cantidad (ton)	Distancia fabricación a puerto (km)	Distancia Puerto a Puerto (km)	Distancia Puerto a Distribución (km)	Distancia Distribuidor #1 a Distribuidor #2	Distancia Fabricación a Distribución (km)	Distancia Distribución a MCC (km)	TKM Camión	TKM Barco	TKM Total
Finca	Aceite Lubricante	Colono Agropecuario	0,00020	-	-	-	-	-	12,3	0,00024	-	0,00024
	Aceite de 2 (Relleno)	Colono Agropecuario	0,00027	-	-	-	-	-	12,3	0,00024	-	0,00024
	Cal Dolomita	Grupo Enlasa, Guatemala	0,00088	-	-	-	-	1048	1,8	0,92	-	0,92
	Carbonato de calcio	Grupo Sur	0,0024	-	-	-	-	84,5	1,8	0,20	-	0,20
	Cobretane	Dow AgroScienes, Colombia	6,38E-07	36,2	844,5 1	211	-	-	1,8	1,59E-04	5,38E-04	6,97E-04
	Crosser	Agroquímica	4,29E-07	-	-	-	-	158	1,8	6,85E-05	-	6,85E-05
	Gallo	Nanjing QIAOSUA Chemical	2,60E-08	345	1507 2	190	-	-	22,8	1,45E-05	3,92E-04	4,07E-04
	Glifosato (Roundup)	Compañía Agrícola Bogotá	1,36E-06	968	922	211	-	-	1,8	1,60E-03	1,25E-03	2,84E-03
	Gramoxone	Sygenta Agro, México DF	1,00E-06	777	2279	190	-	-	22,8	9,86E-04	2,27E-03	3,26E-03
	Metsulfuoron	Nanjing QIAOSUA Chemical	2,10E-08	345	1507 2	190	-	-	22,8	1,18E-08	3,17E-04	3,28E-04
Pintura blanca	Pintura Sur	0,0065	-	-	-	-	84,5	1,8	0,56	-	0,56	

Continuación del Cuadro A.6.6

Proceso	Insumo	Proveedor	Cantidad (ton)	Distancia fabricación a puerto (km)	Distancia Puerto a Puerto (km)	Distancia Puerto a Distribución (km)	Distancia Distribuidor #1 a Distribuidor #2	Distancia Fabricación a Distribución (km)	Distancia Distribución a MCC (km)	TKM Camión	TKM Barco	TKM Total
Finca	Oxifluorfen	Dow AgroScienes, Colombia	2,37E-06	36,2	844,5	211	-	-	1,8	5,90E-04	2,00E-03	2,59E-03
	Rafos	Grupo Yara	0,00026	-	-	-	-	-	126	0,033	-	0,033
	Revital	Grupo Yara	0,00033	-	-	-	-	-	126	0,042	-	0,042
	Sulfato de Amonio	Grupo Yara	5,31E-09	-	-	-	-	-	126	6,69E-07	-	6,69E-07
Procesamiento de Madera	Ácido Bórico Granular	INKABOR	1,3E-05	123	3466	136	-	-	1,8	0,0034	0,045	0,048
	Adhesivo ADEPI	Asko Nobel	0,00020	374	2426	200	-	-	104	0,14	0,48	0,62
	Adhesivo ADHEPI	Asko Nobel	1,4E-05	374	2426	200	-	-	104	0,0092	0,035	0,044
	Plástico Embalaje	Grupo Zoe Comercial S. A	6,4E-05	-	-	-	-	127	1,8	0,0082	-	0,0082

APÉNDICE 6: BASES DE DATOS UTILIZADOS PARA REPRESENTAR LOS DATOS EN SIMAPRO 8.2.3

Cuadro A.6.1. Bases de datos para representar los insumos de la producción de plántulas.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Amonio Cuaternario	Ammonium nitrate, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Aserrín	Saw dust, wet, measured as dry mass {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Bio-active	Alkylbenzene, linear {RER} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Calcimax	Calcium nitrate {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Boric oxide {GLO} production Alloc Rec, U	
Magmax	Magnesium oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Boric oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
Papel Periódico	Waste newspaper {GLO} market for Alloc Rec, U	
Raddix	Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Calcium nitrate {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Magnesium oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Boric oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Zinc oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Sulfur {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Copper oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Manganese(III) oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	
Revital	Ammonium nitrate, as N {RoW} ammonium nitrate production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Potassium chloride, as K2O {RoW} potassium chloride production Alloc Rec, U	
Trichoderma	Magnesium oxide {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Activated silica {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Calcium nitrate {GLO} market for Alloc Rec, U	

Continuación del Cuadro A.6.2

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
20 20 20	Urea, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Ammonium nitrate, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Potassium fertiliser, as K2O {GLO} market for Alloc Rec, U	
	Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO} market for Alloc Rec, U	

Cuadro A.6.2. Bases de datos para representar los insumos de la finca.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Aceite de Cadena Lubricante	Alkylbenzene, linear {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Aceite de 2 (relleno) SAE 40	N-olefins {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Cal dolomita	Soil pH raising agent, as CaCO3 {GLO} lime to generic market for soil pH raising agent Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Magnesium oxide {RoW} production Alloc Rec, U	
Carbonato de Calcio	Soil pH raising agent, as CaCO3 {GLO} lime to generic market for soil pH raising agent Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Cobretane	Dithiocarbamate-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Copper oxide {RoW} production Alloc Rec, U	
Crosser	Phenoxy-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Gallo	[sulfonyl]urea-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Gramoxone	Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Metsulfouron	[sulfonyl]urea-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Rafos	Ammonium nitrate, as N {RoW} ammonium nitrate production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Potassium chloride, as K2O {RoW} potassium chloride production Alloc Rec, U	
	Sodium tetrahydridoborate {GLO} market for Alloc Rec, U	
Revital	Ammonium nitrate, as N {RoW} ammonium nitrate production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
	Potassium chloride, as K2O {RoW} potassium chloride production Alloc Rec, U	
	Sodium tetrahydridoborate {GLO} market for Alloc Rec, U	
Pintura Blanca	Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Roundup	Glyphosate {RER} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Continuación del Cuadro A.6.2

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Oxifluorfen	Diphenylether-compound {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Sulfato de Amonio	Ammonium sulfate, as N {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.6.3. Bases de datos para representar los insumos del procesamiento se madera.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Ácido Bórico	Boric acid, anhydrous, powder {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Adhesivo ADEPI	Isobutyl acetate {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Adhesivo ADHEPI	Vinyl acetate {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Aserrín	Saw dust, loose, wet, measured as dry mass {RoW} sawing, hardwood Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Plástico Embalaje	Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Tarimas	EUR-flat pallet {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.6.4. Bases de datos utilizadas para representar los materiales de empaque.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Polietileno Alta Densidad (PEAD) producido en Latinoamérica	Polyethylene, high density, granulate {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Polietileno Baja Densidad (PEBD) producido en Latinoamérica	Polyethylene, low density, granulate {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Polietileno Alta Densidad (PEAD) producido fuera de Latinoamérica	Polyethylene, high density, granulate {RER} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Polietileno Baja Densidad (PEBD) producido fuera de Latinoamérica	Polyethylene, low density, granulate {RER} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Aluminio	Aluminium alloy, AILi {GLO} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.6.5. Bases de datos utilizadas para representar la matriz energética de Costa Rica en el año 2016.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Energía hidroeléctrica	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Energía geotérmica	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, deep geothermal Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Energía eólica	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, wind, <1MW turbine, onshore Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Energía térmica	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, oil Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Energía biomásica	Electricity, high voltage {GLO} treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Energía solar	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 3kWp facade installation, multi-Si, panel, mounted Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.7.6. Bases de datos utilizadas para representar la producción de energía térmica y los combustibles fósiles.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Producción de energía térmica con aserrín y leña	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, hardwood chips from forest, at furnace 50kW Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Gasolina	Petroleum {US} petroleum and gas production, on-shore Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Gas LPG	Liquefied petroleum gas {RoW} market for Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Diesel	Diesel, low-sulfur {RoW} production Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.7.7. Bases de datos utilizadas para representar el transporte.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Transporte en territorio costarricense	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Transporte en territorios internacionales	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Alloc Rec, U	Ecoinvent 3
Transporte marítimo	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} processing Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.7.8. Base de datos utilizada para representar la fuente de agua.

Entradas	Conjunto de datos	Base de Datos
Agua proveniente de pozo	Water, well, in ground, CR Alloc Rec, U	Ecoinvent 3

Cuadro A.7.9 Bases de datos utilizadas para representar las salidas al aire.

Salidas al aire	Conjunto de datos	Base de Datos
Dióxido de carbono	Carbon Dioxide	-
	Carbon dioxide, fossil	

ANEXOS

ANEXO 1: DATOS DE PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA PARA LA ESTACIÓN METEREOLÓGICA BETANIA, CUTRIS PARA EL AÑO 2016

		Total de precipitación diaria (mm)																														
Mes	Año	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30	D31
1	2016	0.2	0.7	3.3	5.5	15.3	16.8	3.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	13.3	23.8	0.1	6.9	1.4	14.3	8.7	0.0	0.0	0.3	1.2	0.0
2	2016	0.0	0.0	0.0	0.3	3.7	0.0	0.1	9.6	11.4	0.4	8.5	3.8	4.9	2.7	0.5	0.1	0.0	3.6	2.3	5.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.7	14.5	6.6	22.1	0.0		
3	2016	0.0	1.5	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	4.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	2.6	2.1	0.9	0.2	0.4	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0
4	2016	0.0	0.0	0.0	2.6	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
5	2016	0.0	0.0	1.2	39.7	10.4	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.3	10.5	14.2	9.3	0.6	5.3	12.0	11.9	21.0	0.4	18.0	9.3	0.0	0.2	0.3	18.0	0.0	0.2	1.0
6	2016	12.0	0.0	4.7	0.7	33.4	0.0	0.0	12.0	11.5	1.5	9.1	0.6	4.0	11.3	0.1	5.3	6.5	12.8	2.5	55.5	8.1	0.1	1.1	11.8	29.9	24.2	8.6	12.0	10.8	29.0	-
7	2016	10.4	34.0	0.0	3.4	0.2	10.0	54.2	11.8	13.0	13.2	64.8	0.8	8.8	4.4	2.8	5.8	9.7	8.0	1.5	0.1	0.0	19.4	0.3	1.0	0.7	20.7	6.6	0.1	3.5	20.4	2.1
8	2016	0.5	2.7	4.1	22.0	0.1	0.0	8.7	0.2	20.2	0.3	13.1	0.5	0.0	5.0	0.6	0.8	0.9	10.5	12.0	7.5	24.4	2.6	6.3	0.0	0.1	0.0	0.0	4.1	0.4	57.5	0.4
9	2016	11.6	0.0	0.0	2.0	20.3	15.3	7.7	0.8	0.0	5.3	0.1	52.4	0.2	0.0	2.6	0.0	11.2	2.4	1.3	20.7	11.2	1.9	4.7	1.0	0.2	0.0	1.9	1.5	0.1	21.9	-
10	2016	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2	85.7	10.9	2.5	34.6	1.2	22.3	24.7	0.3	0.3	0.2	7.2	0.9	12.2	1.7	3.7	1.2	12.7	24.1	1.2	9.7	13.9	0.1	0.0	0.0	1.6	0.8
11	2016	0.0	0.0	0.0	6.6	7.4	5.2	0.0	0.0	0.0	8.4	16.0	1.2	3.9	2.7	6.2	24.2	0.1	17.6	32.2	3.1	0.2	2.5	9.5	77.6	16.8	4.4	13.8	18.6	0.9	17.3	-
12	2016	2.5	0.0	0.0	27.4	1.9	0.0	0.3	22.7	39.5	23.7	35.3	20.8	23.9	7.5	3.7	45.0	8.0	1.5	9.5	71.3	40.9	17.7	12.3	1.0	0.0	5.3	44.0	11.0	3.1	14.1	28.9