Análisis del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela como herramienta de evaluación de impactos ambientales en un trapiche panelero del municipio de Rovira, Tolima

Estefanía Bohórquez Andrade

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, octubre de 2018

Análisis del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela como herramienta de evaluación de impactos ambientales en un trapiche panelero del municipio de Rovira, Tolima

Estefanía Bohórquez Andrade

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:
Kenneth Ochoa

Áreas de profundización: Gestión y productividad sustentable y Seguridad alimentaria.

Línea de Investigación: Gestión Integral Sustentable.

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Agradecimientos

Antes que nada agradezco a Dios por siempre acompañarme en cada paso que doy, por darme la fuerza para seguir adelante ante cualquier adversidad y por colocar en mí camino a todos aquellos que de alguna manera me ayudaron a culminar este proyecto de investigación.

Quiero agradecer a la Universidad El Bosque por brindarme las herramientas y aptitudes necesarias para la ejecución de este proyecto. A los docentes por su apoyo constante durante estos cinco años y especialmente a mi director Kenneth Ochoa Vargas por su guía, colaboración y motivación durante todo el proceso de construcción de este documento.

Agradezco a los propietarios de la finca Las Camelias por su grata disposición y ayuda ante cualquier inquietud, sin ellos no habría sido posible el desarrollo de este trabajo. Finalmente doy las gracias a mi familia por creer en mí, por apoyarme y siempre alentarme a cumplir todas las metas que me propongo.

Tabla de contenido

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional 4
Agradecimientos 5
Tabla de contenido 6
Listado de tablas 8
Listado de figuras 8
Lista de siglas 10
Resumen 11
Abstract 11
Introducción 11
1. Planteamiento del problema 13
2. Pregunta de investigación 14
3. Justificación 14
4. Objetivos 15
4.1. Objetivo general 15
4.2. Objetivos específicos 15
5. Marcos de referencia 15
5.1. Marco conceptual 15
5.1.1. Análisis de ciclo de vida (LCA) 15
5.1.2. Enfoque de ciclo de vida 16
5.1.3. Eco-balance 16
5.1.4. Evaluación del impacto ambiental (EIA) 17
5.1.5. Gestión ambiental empresarial 17
5.1.6. Metabolismo Industrial 17
5.1.7. Producción Más Limpia (PML) 18
5.1.8. Unidad Funcional 18
5.2. Marco teórico 18
5.2.1 Elaboración de la panela 21
5.3. Marco de antecedentes 22
5.3.1. Antecedentes 22
5.3.2. Estado del arte 23
5.4. Marco geográfico 27
5.5. Marco Institucional 29
5.6. Marco normativo 29

5.6.1. Normatividad colombiana 29
5.6.2. Normatividad de carácter voluntario 32
6. Metodología 33
6.1. Enfoque, alcance y método de investigación 33
6.2. Marco metodológico 33
6.2.1. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico 1 33
6.2.2. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico 2 35
7. Resultados y discusión 36
7.1. Resultados del objetivo específico 1 36
7.1.1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV de la etapa de producción de la panela 36
7.1.1.1. Objetivo del ACV 36
7.1.1.2. Alcance del ACV 36
7.1.2. Inventario del ciclo de vida de la panela: 43
7.1.2.1. Datos de primer plano 43
7.1.2.2. Datos de segundo plano 44
7.1.3. EICV de la panela: 47
7.1.4. Interpretación de los resultados 52
7.1.4.1. Identificación de los asuntos significativos 52
7.1.4.2. Análisis de sensibilidad 60
7.1.4.2.1. Simulación del escenario sin caña de azúcar 60
7.1.4.2.1 Simulación del escenario del sistema con motor eléctrico 64
7.2. Resultados del objetivo específico 2: 66
7.2.1. Uso de motor eléctrico 66
7.2.1.1. Desarrollo de la medida 67
7.2.1.2. Factibilidad de la medida de ser implementada 68
7.2.3. Recomendaciones adicionales orientadas desde la gestión ambiental 73
8. Conclusiones 76
9. Recomendaciones 78
Referencias Bibliográficas 79
Anexos 87
Anexo A: Formato de recolección de información 87

Anexo B: ICV de artículos científicos 92
Anexo C: Cálculos del ICV..... 93
Anexo D: Cálculos de simulación del escenario del sistema: 99

Listado de tablas

Tabla 1. Resultados de mediciones de ° Brix y temperatura..... 43
Tabla 2. Inventario global de producción de 1kg de panela..... 44
Tabla 3. Descripción de bases de datos..... 45
Tabla 4. Matriz energética Perú-Colombia 45
Tabla 5. Valores de ponderación, comparación de motores..... 67
Tabla 6. CUP de panela..... 68
Tabla 7. Escenario económico actual de la empresa..... 69
Tabla 8. CUP de panela escenario alterno..... 70
Tabla 9. Costos de inversión 70
Tabla 10. Escenario económico alterno de la empresa 71
Tabla 11. TIR, VPN y Tiempo de retorno..... 72

Listado de figuras

Figura 1. Proceso de elaboración de la panela 22
Figura 2. División político-administrativa de Tolima..... 28
Figura 4. Fases del ACV 34
Figura 5. Fase de interpretación de resultados 35
Figura 6. Diagrama de flujos del sistema..... 37
Figura 7. Recepción de la caña de azúcar 37
Figura 8. Extracción del jugo 38
Figura 9. Pre-Limpieza..... 38
Figura 10. Clarificación 39
Figura 11. Evaporación y Concentración..... 39
Figura 12. Batido y punteo..... 40
Figura 13. Moldeo y Enfriamiento 40
Figura 14. Limpieza de utensilios..... 41
Figura 15. Sistema del producto y sus límites..... 42
Figura 16. Procesos creados y modificados 46
Figura 17. Elementos de primer nivel del diagrama de red 48
Figura 18. Diagrama de red del proceso productivo de la panela 49

Figura 19. . Caracterización del ciclo de vida de la etapa producción de la panela 50
Figura 20. Evaluación del daño del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela .. 50
Figura 21. Normalización del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela 50
Figura 22. Ponderación del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela..... 51
Figura 23. Análisis de categorías según sustancias, Cambio climático 53
Figura 24. Análisis de categorías según sustancias, Disminución capa de ozono..... 54
Figura 25. Análisis de categorías según sustancias, Efectos cancerígenos 54
Figura 26. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas inorgánicas 55
Figura 27. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas orgánicas ... 56
Figura 28. Análisis de categorías según sustancias, Radiación ionizante..... 56
Figura 29. Análisis de categorías según sustancias, Ecotoxicidad 57
Figura 30. Análisis de categorías según sustancias, Acidificación/Eutrofización 57
Figura 31. Análisis de categorías según sustancias, Uso del suelo 58
Figura 32. Análisis de categorías según sustancias, Uso de minerales..... 59
Figura 33. Análisis de categorías según sustancias, Agotamiento de combustibles fósiles 59
Figura 34. Diagrama de red del proceso productivo de la panela sin caña de azúcar 61
Figura 35. Caracterización del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar 62
Figura 36. Ponderación del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar 62
Figura 37. Ponderación del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar por categoría de impacto 63
Figura 38. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas inorgánicas 63
Figura 39. Comparación entre motor con ACPM y motor eléctrico en ponderación por categorías de agrupación 64
Figura 40. Comparación entre motor con ACPM y motor eléctrico en caracerización..... 65
Figura 40. Gráfica de VPN vs precio de panela ($)..... 73
Figura 41. Molino eficiente 74
Figura 42. Esquema general de planta mejorada 76

Lista de siglas

ACPM	Aceite Combustible Para Motores
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ASOCAÑA	Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia
BPM	Buenas Prácticas de Manufactura
CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia
EI	Ecología Industrial
EICV	Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida
EPA	Agencia de Protección del Medio Ambiente, por sus siglas en inglés
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FEDEPANELA	Federación Nacional de Productores de Panela de Colombia
GAE	Gestión Ambiental Empresarial
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación de Colombia
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IPS	Índice de Precios al Consumidor
ISO	Organización Internacional de Estandarización, por sus siglas en inglés
Mnsm	Metros sobre el nivel del mar
NTC	Norma Técnica Colombiana
PIB	Producto Interno Bruto
PML	Producción Más Limpia
ROI	Retorno de la Inversión
SAC	Sociedad Colombiana de Agricultores
SIGAC	Sistema de Gestión Ambiental Comunitario
TIR	Tasa Interna de Retorno
TGS	Teoría General de Sistemas
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, por sus siglas en inglés
UF	Unidad Funcional
VPN	Valor Presente Neto

Análisis del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela como herramienta de evaluación de impactos ambientales en un trapiche panelero del municipio de Rovira, Tolima

Resumen

El presente documento tiene como fin evaluar los impactos ambientales de la elaboración de panela en un trapiche panelero del municipio de Rovira (Tolima), mediante un análisis de ciclo de vida enfocado en la etapa productiva del proceso desde la fase de extracción del jugo hasta el moldeo del producto. Para realizar la evaluación se siguieron los lineamientos de las NTC-ISO 14040 y 14044 y se determinaron los flujos de masa y energía con el fin de identificar los puntos críticos del sistema por medio del método Eco-indicator 99 presente en el software SimaPro 8.2. Se logró determinar que los impactos significativos se deben al uso excesivo de caña y ACPM durante la fase de extracción del jugo y a la quema de bagazo seco durante la evaporación y concentración de la miel. Por lo cual, se formularon recomendaciones de mejora desde la GAE con el fin de mejorar el desempeño ambiental del proceso productivo.

Abstract

The purpose of this document is to evaluate the environmental impacts of the production of panela in a sugar mill in the municipality of Rovira (Tolima), through a life cycle analysis focused on the production stage of the process from the juice extraction phase until the molding of the product. To carry out the evaluation, the guidelines of the NTC-ISO 14040 and 14044 were followed and the mass and energy flows were determined in order to identify the critical points of the system by means of the Eco-indicator 99 method present in the SimaPro 8.2 software. It was determined that the effects should be used the excessive use of the cane and ACPM during the extraction phase of the juice and the amount of dry bagasse during the evaporation and the concentration of the honey. Therefore, consult the recommendations form to improve the environmental performance of the production process.

Introducción

La agroindustria de la panela es una de las más tradicionales en América Latina y el Caribe. Colombia por su parte ocupa el segundo lugar de producción a nivel mundial. Sus orígenes se remontan a 1538, cuando los colonos introdujeron la caña de azúcar a través de Cartagena y dos años después fue plantada en el margen izquierdo del río Cauca donde comenzaron a operar los primeros trapiches paneleros (CENICAÑA, 2018).

La economía de la panela se encuentra enmarcada en la producción de materia prima, la transformación de la materia prima y la rama de comercio y servicios, donde el sector manufacturero es considerado el eje de desarrollo en la cadena de valor. La producción colombiana se clasifica según el tamaño de explotación en diferentes contextos regionales con sus propias especificaciones tecnológicas y socioeconómicas. Las unidades de pequeña escala tienen un alto uso de mano de obra y bajos niveles de inversión tecnológica, las explotaciones medianas poseen un mayor grado de tecnificación, mientras que las de gran escala tienen los mayores índices de productividad y los beneficios más altos. Dado que este proyecto de investigación busca ser lo más representativo posible, fue escogida una finca ubicada en el municipio de Rovira (Tolima). "Las Camelias" cuenta con 12 ha de extensión de cultivo de caña y tiene una unidad de producción entre 100-150kg de panela por hora. Estas características la catalogan dentro del nivel de explotación pequeña, siendo el más característico dentro la agroindustria panelera colombiana (Zambrano, 2005).

Las costumbres generacionales de producción continúan vigentes debido a las bajas tasas de introducción tecnológica en los procesos, principalmente en las explotaciones de pequeña escala. Los problemas más relevantes de este tipo de explotación se deben a la baja competitividad en el mercado por los bajos rendimientos productivos y la alta fluctuación de los precios, la deficiente calidad de la panela por las insipientes condiciones de las instalaciones y medidas sanitarias y por último, los impactos ambientales generados por el poco control que se le da a las emisiones atmosféricas, los vertimientos y residuos sólidos.

Ante las problemáticas complejas que aquejan el subsector panelero y teniendo en cuenta la alta producción y consumo en el país, este estudio tiene por objeto evaluar los potenciales impactos ambientales de la etapa de producción de la panela en el trapiche de estudio por medio de un análisis de ciclo de vida. Este documento presenta en primera instancia la metodología del ACV mediante el software SimaPro 8.2, siguiendo además los lineamientos de las NTC-ISO 14040 y 14044. Al realizar la revisión bibliográfica se encontraron únicamente dos estudios de ACV de la panela, de ahí surge la necesidad de ejecutar este proyecto ya que puede dar un mayor acercamiento sobre la identificación y cuantificación de las cargas ambientales del proceso tradicional en Colombia.

Adicional a esto, se requiere incorporar herramientas y metodologías que permitan el mejoramiento de las condiciones de producción de forma compatible con el ambiente. Por estos motivos, se planteó una propuesta de alternativas del proceso desde la gestión ambiental con el fin de optimizar los puntos críticos encontrados en el ACV y así mismo minimizar los impactos ambientales que presentan riesgos para el entorno y la salud de la población expuesta. Se pretende que las recomendaciones planteadas puedan ser aplicadas para la toma de decisiones futuras por parte de los propietarios de trapiches con características similares a la zona de estudio.

1. Planteamiento del problema

Actualmente Colombia es el segundo productor de panela y el primer consumidor a nivel mundial (Espinal, Martínez, Ortíz, & Acevedo, 2005). A pesar de esto, las tasas de introducción tecnológica al proceso son bajas por lo que el 83% de los trapiches son de carácter artesanal (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2006) .La agroindustria panelera es una actividad que genera impactos ambientales significativos, principalmente durante el proceso productivo, por la alteración de la composición atmosférica y el microclima y la contaminación del recurso hídrico (Ordoñez & Rueda, 2017).

Durante la obtención de materias primas se realizan actividades negativas para el ambiente como la tala de árboles para establecer el cultivo, lo que ocasiona deforestación y pérdida de biodiversidad en las zonas aledañas al trapiche. La aplicación de fertilizantes en el cultivo de caña de azúcar aumenta la concentración de nutrientes en el suelo y aguas superficiales y subterráneas por su alto contenido de Nitrógeno y Fósforo (A. Hernández, Reinosa, & Hernández, 2017). Durante el proceso productivo se utiliza como combustible bagazo húmedo, el cual produce emisiones como NOx, SO_2 y MP, debido a la combustión incompleta en la cámara de combustión de la hornilla (A. Hernández et al., 2017). Sin embargo, por la baja eficiencia energética del bagazo, se requieren combustibles auxiliares como llantas, leña y carbón mineral, que, junto con la baja transferencia de calor en la hornilla, emiten gases tóxicos a la atmósfera como CO, CO_2, NOx, SOx y vapor de agua (Osorio, 2007). Estos gases a su vez deterioran la calidad del aire, al ser gases de efecto invernadero que ocasionan lluvia ácida y smog (Guerrero & Luengas, 2013).

Por otro lado, se utiliza una gran cantidad de recurso hídrico, ya que se requiere abundante agua limpia cada 12 horas para el lavado de los pre-limpiadores con el fin de eliminar lodos, arenas y residuos de la molienda (Osorio, 2007). En la mayoría de los trapiches de Colombia, las instalaciones sanitarias y el tratamiento de afluentes son ineficientes o inexistentes, por lo que a los vertimientos no se les realiza ningún tipo de tratamiento para reducir la carga contaminante y son descargados directamente a los sistemas de alcantarillado locales o a los cuerpos hídricos. Por ende, estas aguas residuales contaminan los cuerpos de agua superficiales y el vertimiento sobre el suelo contamina las aguas subterráneas por infiltración (Guerrero & Luengas, 2013).

Al evidenciar que la producción de panela es una actividad que genera impactos ambientales significativos y que únicamente se encontraron 2 estudios de ciclo de vida del proceso, surge la necesidad de cuantificar las potenciales cargas ambientales en un trapiche artesanal. Esto con el fin de realizar una propuesta de mejoras del proceso para que sea más sostenible y pueda ser implementada en los trapiches tradicionales de Colombia y el mundo.

2. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los impactos ambientales que se generan durante la etapa de producción de la panela en un trapiche panelero de Rovira (Tolima) identificados por medio del método de Análisis de Ciclo de Vida?

3. Justificación

En la actualidad, únicamente 25 países producen panela a nivel mundial. Sin embargo, dicha producción se concentra en dos países, en primer lugar, se encuentra India con un 60,17 % y en segundo lugar Colombia con un 14,86% (FEDEPANELA, 2018). Colombia por su parte se ha consolidado como el mayor consumidor a nivel mundial con 34,2 kg/Hab*año superando a la India que consume 7,9 kg/Hab*año y al promedio mundial de 2 kg/Hab*año (Espinal et al., 2005). La importancia de la producción de panela en Colombia radica en que la caña de azúcar ocupa el segundo lugar en extensión de cultivos permanentes después del café, con 249.384Ha y a su vez el 61% del área total cultivada está destinada a la producción de panela, mientras que el azúcar ocupa un 32% y las mieles, guarapos y forrajes un 7% (Osorio, 2007).

La producción de panela es una actividad que tiene una gran importancia socioeconómica en el país, con una participación del 6,7% en el PIB agrícola nacional (Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, SAC, & FEDEPANELA, 2002). Se encuentra en 511 municipios y es el eje económico en 117, además constituye el segundo renglón generador de empleo en las zonas rurales después del café, donde se vinculan aproximadamente 350.000 de personas, es decir, el 12% de la población rural económicamente activa, de las cuales 287.000 tienen empleos permanentes equivalentes a más de 45 millones de jornales al año (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2016).

Se estima que, de las 21.000 unidades productoras existentes, el 83% se sitúan en el rango de pequeñas (capacidad menor a 100 kg/hora), el 15% medianas (entre 150-250 kg/hora) y tan solo el 2% son grandes empresas (superior a 250 kg/hora) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2013). Esta agroindustria se caracteriza por realizarse en pequeñas explotaciones campesinas, en zonas de montaña entre los 700 y 2000 msnm, en terrenos de ladera en su mayoría, donde la topografía es abrupta y de difícil acceso.
Esto ha dificultado el acceso de las tecnologías ofrecidas por diferentes instituciones públicas y privadas que buscan que los productores sean más competitivos y mejoren la gestión ambiental de las actividades productivas del sector. Otras variables que dificultan dicho acceso son los altos costos de las tecnologías limpias y la falta de programas de capacitación y acompañamiento técnico (Ministerio del Medio Ambiente de Colombia et al., 2002).
Debido a que la mayoría de las plantas de producción son informales y presentan limitaciones de espacio e infraestructura física y tecnológica, no existen suficientes datos confiables sobre los volúmenes de producción ni sobre los impactos ambientales que se generan. La falta de

conocimiento del manejo integral de residuos y vertimientos, el inadecuado uso de materias primas e insumos y de tecnologías ineficientes, son algunas de las causas del deterioro ambiental generado por esta actividad. Se debe tener en cuenta que es necesario que todo tipo de empresa productiva y de servicios implemente criterios ambientales y mecanismos de producción más limpia que permitan mejorar el desempeño ambiental de los diferentes procesos que realiza (Osorio, 2007).

Teniendo en cuenta las problemáticas tanto ambientales como sociales y económicas que giran en torno a la producción de panela, el ingeniero ambiental de la Universidad del Bosque se encuentra en la capacidad de identificar los puntos críticos del sistema, además de contar con la aptitud de afrontar y resolver exigencias en materia ambiental de la sociedad y de responder a las necesidades de producción más limpia (Universidad El Bosque, 2018).

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar los impactos ambientales de la etapa de producción de la panela en un trapiche panelero ubicado en el municipio de Rovira (Tolima) por medio de un análisis de ciclo de vida para establecer medidas desde la Gestión Ambiental Empresarial.

4.2. Objetivos específicos

1. Elaborar un Análisis de Ciclo de Vida de la etapa de producción de la panela en un trapiche panelero ubicado en el municipio de Rovira (Tolima).
2. Generar una propuesta de alternativas desde la gestión ambiental de acuerdo con los puntos críticos establecidos en el análisis de ciclo de vida.

5. Marcos de referencia

5.1. Marco conceptual

El objetivo de este marco consiste en suministrar información sobre las principales definiciones que se abordarán en el proyecto de investigación. Esto con el fin de presentar los rasgos principales de los conceptos y hacerlos más precisos (Ramírez, 2008).

5.1.1. Análisis de ciclo de vida (LCA)

Es un método definido por los estándares internacionales ISO 14040 e ISO 14044, con el propósito de analizar los aspectos e impactos ambientales de los sistemas productivos. Tiene en cuenta todo el ciclo de vida del producto, es decir desde “la cuna hasta la tumba”, a partir de la adquisición de materias primas, pasando por la producción y uso, hasta la disposición

final. El sistema de producto está compuesto por sistemas unitarios que convierten el sistema simplista en uno complejo, ya que incluye otras variables interconectadas como las diversas materias primas involucradas, el suministro de energía, los co-productos, la gestión de residuos, los diversos tipos de eliminación y reciclaje, entre otros. Este método categoriza los impactos ambientales que necesitan consideración según el uso de los recursos naturales, la salud humana y las consecuencias ecológicas (Klöpffer & Grahl, 2014).

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite crear estrategias para disminuir el consumo de recursos naturales y energía y para minimizar la contaminación y los residuos, pero también constituye un instrumento que implica ahorro de costes y ventajas competitivas en los sectores comerciales e industriales (Jensen, Hoffman, Møller, & Schmidt, 1997).

5.1.2. Enfoque de ciclo de vida

Es una visión integrada que busca conocer las cargas ambientales que se generan durante todo el ciclo de vida de un producto o servicio por una empresa e implementar acciones de mejora. Se deben identificar todos los procesos unitarios y realizar un análisis de entradas y salidas y que estos resultados puedan ser utilizados para establecer un análisis de ciclo de vida con el que se pretende minimizar las cargas ambientales que genere determinada empresa (Jensen et al., 1997).

Existen diversos enfoques que van desde lo cualitativo como el concepto de ciclo de vida hasta lo cuantitativo como el análisis de ciclo de vida. Un enfoque de ciclo de vida puede ser adoptado por los gobiernos en la formulación de políticas al aplicar modelos de ciclo de vida o políticas integrales de producto. En el sector privado este enfoque se puede aplicar en el diseño de productos y servicios basados en el análisis de ciclo de vida, el análisis de costos o en sistemas de administración orientados a determinados productos (UNEP, 2004).

5.1.3. Eco-balance

Es una herramienta que permite identificar el área de un proceso que requiere intervención. Para realizar un eco-balance es necesario determinar las entradas y salidas del proceso, evaluar los efectos de disposición y consumos de productos y subproductos, identificar y evaluar los aspectos ambientales de los materiales y energía utilizados, asignar las entradas y salidas a las unidades del proceso e identificar los impactos ambientales de las actividades relacionadas indirectamente con el proceso (Barrios & Loreto, 2003).
Los ecobalances dan una estructura para inventariar, calcular y comparar datos de la metodología de análisis de ciclo de vida. Esto se debe a que en cada fase existe una balanza que pesa las entradas y salidas de materiales, energía y emisiones (Suppen & van Hoof, 2005).

5.1.4. Evaluación del impacto ambiental (EIA)

Es la actividad encargada de la identificación, cuantificación, interpretación y comunicación de los impactos generados a la salud y el ambiente por las actividades antrópicas. Esta evaluación es utilizada generalmente durante la fase de planificación para determinar los cambios en el entorno por un determinado proceso. El nivel de detalle en una EIA es mayor que en un ACV, ya que tiene en cuenta aspectos más específicos. Por esta razón, la EIA puede suministrar datos relevantes del sitio, aportando información importante para la realización de estudios de análisis de ciclo de vida (Jensen et al., 1997).

5.1.5. Gestión ambiental empresarial

La gestión ambiental es un sistema de funciones que consisten en el desarrollo, implementación y monitoreo de estrategias ambientales organizacionales. Esto con el fin de prevenir, reducir, minimizar y remediar los efectos ambientales negativos que genere la organización. El enfoque tradicional de la gestión ambiental consistía en cumplir las regulaciones ambientales, lo que incluye la búsqueda de permisos, el monitoreo de emisiones contaminantes y la presentación de informes para evitar multas. Pero hoy en día existen políticas regulatorias voluntarias que han sido introducidas como incentivos económicos y de mercado, donde las empresas incluyen la gestión ambiental para cumplir las necesidades de los consumidores conscientes del cuidado ambiental, para tener un mejor manejo de los recursos naturales y económicos. Las empresas reconocen la importancia de la gestión ambiental por lo que ha crecido la implementación de prácticas para reducir los daños causados al ambiente como: el diseño ecológico de productos, el reciclaje y la reducción de residuos, la adopción de tecnologías limpias y transporte verde (Wong, Lai, Lun, & Cheng, 2015).

5.1.6. Metabolismo Industrial

Es la metodología base de la ecología industrial. Posee un enfoque descriptivo y analítico y se basa en el principio de conservación de masas. Tiene como objetivo comprender los patrones complejos y la dinámica de flujos y materiales de reserva y energía en el sistema industrial y a su vez, sus interacciones con la biósfera. Puede ser aplicada a sustancias, procesos, zonas, regiones e incluso países. Para comprender la estructura, cantidad y calidad del metabolismo industrial es necesario el análisis de flujos de material desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. El análisis puede ser dirigido en diversos métodos como el análisis de ciclo de vida (ACV), los requisitos de entrada acumulada (CER) o la entrada de material por unidad de servicio (MIPS). Estos métodos determinan datos clave sobre las entradas y salidas de un proceso y pueden ser utilizados para informes de desempeño ambiental y proporcionan información importante para la gestión ambiental empresarial. Por otro lado, el metabolismo de comunidades, regiones y economías nacionales cada vez es más importante para la toma de decisiones políticas, donde se tienen en cuenta

tanto el suministro y uso sostenible de recursos como las emisiones y vertimientos generados al entorno (Bourg & Erkman, 2003).

5.1.7. Producción Más Limpia (PML)

UNEP adoptó el término de producción más limpia en 1989 como" la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos y productos para reducir los riesgos generados a las personas y el ambiente". Dentro de los principios de la Producción más limpia se encuentran conservación de materias primas, la reducción de la cantidad y toxicidad de las emisiones y residuos y la ecoeficiencia. Tiene como objeto reducir los impactos ambientales negativos que se generan a lo largo del ciclo de vida del producto y de igual forma reducir los costos operativos y mejorar la productividad para una compañía (Shah, 2015).

El proceso continuo de producción más limpia consta de: Comparar el uso actual de los recursos a través del análisis de entrada-proceso-salida; Identificar y cuantificar oportunidades para minimizar residuos; Realizar una evaluación de producción más limpia; Desarrollar un plan de implementación; Implementar las acciones del plan; Identificar las nuevas oportunidades a partir del rendimiento. Esto implica un compromiso total de sostenibilidad corporativa que permite generar olas de innovación que van más allá de los límites de desempeño empresarial (Shah, 2015).

5.1.8. Unidad Funcional

Es la unidad de referencia que se emplea para medir el desempeño de las entradas y salidas del análisis de ciclo de vida. Para establecer la unidad funcional se debe conocer el objetivo y el alcance del estudio ACV porque debe ir en concordancia con ellos. Debe ser claramente definida y ser medible, lo que permitirá valorar y comparar de manera objetiva todos los impactos generados en el ciclo de vida del sistema de producto bajo estudio (ICONTEC, 2007).
La unidad funcional es la base de un análisis de ciclo de vida, para definirla es necesario identificar la eficiencia y durabilidad del producto y el estándar de calidad de rendimiento. Todos los datos que sean recopilados en la fase del inventario deben estar relacionados con la unidad funcional, ya que, con base en esta, se normaliza toda la información de entradas y salidas del sistema. Además, establece la escala para la comparación de dos o más productos, cuyos sistemas deben realizarse con la misma unidad funcional y en flujos de referencia equivalentes (Jensen et al., 1997).

5.2. Marco teórico

El marco teórico constituye una descripción detallada de los elementos esenciales de las teorías en las que se soporta el proyecto de investigación. Este marco permite delimitar el

área de investigación, sugerir guías de investigación y generar proposiciones de técnicas y procedimientos que surjan durante el desarrollo del estudio (Ramírez, 2008). A continuación, se presentan las teorías en las que se sustenta esta monografía:

En primer lugar, se tiene como base teórica la **Ecología industrial (EI)** cuya base metodológica es el estudio del metabolismo industrial. El objetivo de esta teoría consiste en "comprender el funcionamiento de la base física de las sociedades, las interconexiones de los procesos y las redes de cadenas de productos y el intercambio de materiales y energía en el ambiente"(Bourg & Erkman, 2003). Con el fin de asimilar los sistemas industriales con los ecosistemas naturales mediante la interrelación entre industrias, medio social y natural. La ecología industrial representa un camino para dar una solución real al concepto del desarrollo sostenible de una manera económicamente viable. Cabe resaltar que esta teoría no es nueva, su origen se remonta a la introducción del término por Frosch & Gallopoulos (1989). Desde entonces, no se ha determinado una definición estándar, aunque todos los autores coinciden en tres elementos clave para la perspectiva de ecología industrial. El primero consiste en una visión sistémica e integral de los componentes de la economía industrial y su relación con la biósfera. El segundo enfatiza la base biofísica de las actividades humanas, lo que se refiere a los patrones de flujos de materiales tanto dentro como fuera del sistema industrial. El tercero considera la dinámica tecnológica como un elemento crucial para la transición de un sistema industrial insostenible a uno sostenible (Bourg & Erkman, 2003).

Autores como Gemma, Cervantes & Torre-Marín (2011), hablan sobre la tendencia de la ecología industrial a cerrar el ciclo de materia y así tener un nivel cero de residuos, utilizando residuos de una industria como materia prima de otra, tal como lo hacen los ecosistemas naturales (Cervantes, 2011). Esta estrategia de optimización es una de las principales características de la ecología industrial y aunque hay un número creciente de este tipo de proyectos en el mundo, sólo es un paso alentador, ya que la EI va más allá de la gestión ambiental empresarial. Su objetivo es la "eco-reestructuración" del sistema industrial para que evolucione hacia un modo de funcionamiento compatible con la biósfera y sea sostenible a largo plazo (Bourg & Erkman, 2003).

Otra de las teorías que dan sustento a esta investigación es la **Teoría general de sistemas (TGS)**. Durante varias décadas han aparecido diversas definiciones sobre este término, pero según Forrester (1994) no tiene sentido darle una definición precisa ya que el término cubre una amplia gama de fenómenos y no uno en particular. Senge (1990) lo define como una disciplina para entender los sistemas y las interrelaciones que los componen. Más adelante, Senge (1994) agregó que esta disciplina permite ver cómo cambian los sistemas de manera más efectiva para actuar acorde a los procesos del mundo natural y económico. Frank (2010) sugirió que se requiere una gran capacidad para ver el sistema completo y no detenerse en los detalles, más bien entender la situación general del sistema para lograr analizarlo. La amplia gama de campos en la que se desarrolla este concepto refleja que no es una disciplina de límites definidos, sino que se puede adaptar a una amplia gama de áreas. Una versión más reciente ofrecida por Arnold & Wade (2015) consiste en el "conjunto de habilidades

analíticas utilizadas para mejorar la capacidad de identificar y comprender los sistemas, predecir sus comportamientos e idear modificaciones para producir los efectos deseados" (Frank & Miles, 2016).
Existen 3 amplias áreas de entendimiento de los sistemas: los sistemas naturales, de ingeniería y humanos. Para los sistemas humanos, la teoría general de sistemas ha sido acogida por pensadores de gestión para adoptar el modelo de sistema abierto a sus organizaciones. Consiste en ver el sistema como una estructura compleja que se diferencia en subsistemas con sus propias partes. Las estrechas interrelaciones entre los subsistemas deben asegurar la homeostasis, actuando con una especie de capacidad de gestión que permite garantizar integración y coordinación. El sistema toma insumos de materia, energía e información del entorno y los transforma en salidas. El énfasis de la organización circular da una primordial importancia a las relaciones entre la organización y el ambiente, para así cambiar la estructura organizacional y dar respuesta a las perturbaciones ambientales (Jackson, 2003).

De acuerdo con Jackson. M (2003) para un mayor entendimiento de la TGS se deben tener en cuenta las partes interesadas que están involucradas en el sistema. Por esta razón, es relevante incorporar la **Teoría de grupos de interés o Stakeholders** al proyecto de investigación. De acuerdo con Freeman (1984) la definición de un stakeholder es "cualquier grupo o individuo que es o puede ser afectado por el cumplimiento de los objetivos de una organización". Para el año 2004, Freeman adoptó la definición de los grupos de interés a "aquellos grupos que son vitales para la supervivencia y el éxito de la organización" y elabora tres principios: Principio de habilitación de los interesados; de responsabilidad del director y de recuso de los interesados. El primero se refiere a que las corporaciones deben administrar en interés de los grupos de interés. El segundo consiste en que los directores deben tener cuidado al usar su juicio razonable para definir y dirigir los asuntos de la corporación de acuerdo con el principio uno. El tercero trata sobre el poder de los interesados para entablar una acción contra los directores por no cumplir con los deberes establecidos en el principio dos. Estos principios tienen como fin que, si los gerentes traten a las partes interesadas como el concepto dado de stakeholders, la organización tendrá éxito y será más sostenible (Friedman & Miles, 2006).
De acuerdo con O'riordan (2017) el compromiso de los grupos de interés obliga a una organización involucrar a los actores implicados en la identificación, comprensión, respuesta y presentación de informes sobre cuestiones de sostenibilidad. Este compromiso puede verse como una actividad de gestión y es crucial para el éxito de una organización, ya que la participación de los interesados constituye un mecanismo para la toma decisiones con el objetivo de desarrollar y lograr de respuestas estratégicas y responsables para la creación de valor sostenible (O'Riordan, 2017).

5.2.1 Elaboración de la panela

Para la descripción del proceso de elaboración de la panela, se tuvo como línea base el *Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela*, elaborado en el acuerdo suscrito por el gobierno de Antioquia, Gerencia de Seguridad Alimentaria y Nutricional y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Osorio, 2007).. En este manual se presentan cada uno de los pasos para obtener panela, desde la preparación del cultivo de caña de azúcar hasta la obtención del producto final. Sin embargo, por términos de practicidad de este proyecto de investigación, únicamente van a ser tenidos en cuenta aquellos procesos que hacen parte de la etapa productiva de la panela.

Inicialmente, la caña cortada que se encuentra almacenada en el trapiche se somete al proceso de **molienda,** el cual consiste en pasar la caña cortada por el molino para obtener entre 47-67% de jugo o guarapo crudo como producto principal y bagazo húmedo como subproducto. El jugo crudo se somete a un proceso de **Pre-limpieza de los jugos** por decantación natural. El pre-limpiador retiene una importante proporción de sólidos presentes en el jugo como partículas de lodo, tierra y arena y también partículas livianas como bagacillos, hojas e insectos. El jugo se dirige a la paila recibidora de la hornilla o descachazadora para empezar a calentarse a una temperatura entre 2-3ºC por encima de la temperatura ambiente hasta alcanzar los 50-55ºC. La acción combinada del calor y aglutinantes naturales dan lugar a la **clarificación**, donde se genera una espuma que contiene los últimos sólidos en suspensión y sustancias coloidales. Estas impurezas flotantes se denominan cachaza y se retiran manualmente del jugo. El último paso de la limpieza se llama **encalado** y consiste en añadir cal con el fin de regular la acidez de los jugos para conseguir un pH de 5,8 y así prevenir azúcares reductores (Osorio, 2007).

Cuando las pailas u hornillas comienzan a elevar su temperatura, inicia la **evaporación** de los jugos, allí se elimina cerca del 90% de agua, lo que aumenta el contenido de sólidos solubles hasta alcanzar el punto miel (entre 90-94 ° Brix). El calentamiento de los jugos a 96°C permite obtener la **concentración** de los sólidos apropiada para su posterior moldeo. A los jugos recogidos en el fondo de la paila punteadora o concentradora se les añade un agente antiespumante y antiadherente para homogenizar la miel y evitar que la panela se queme. En la fase de **punteo** se hace un paleo manual en la paila punteadora en presencia de calor para incorporar aire a las mieles. Luego se depositan en un recipiente y por acción de **batido** intensivo e intermitente se consigue cambiar su estructura y textura y quitarles su capacidad de adherencia. La miel cristalizada se dispone al **moldeo** en las gaveras de preferencia para obtener la presentación deseada, allí se deja la panela en enfriamiento hasta que adquiera su máximo estado de compactación. Finalmente, se realiza el **empaque** del producto en bolsas termoencogibles por unidad y estas a su vez se empacan en bolsas de papel o en cajas de cartón. Cabe resaltar que los equipos y utensilios de limpieza requieren un mantenimiento y

limpieza mínimo cada 12 horas para garantizar su adecuado funcionamiento y evitar la fermentación de los jugos (Osorio, 2007).

Figura 1. Proceso de elaboración de la panela

Fuente: (INVIMA & FEDEPANELA, 2009)

5.3. Marco de antecedentes

En este apartado se presenta la recopilación de información sobre las investigaciones previas que estén relacionadas con el estudio desde múltiples y diversas perspectivas. Se deben tener en cuenta los enfoques, hipótesis, resultados, métodos, técnicas utilizadas, conclusiones y problemas que han surgido durante su desarrollo (Ramírez, 2008). A continuación, se realiza un acercamiento sobre la introducción del concepto ACV en el subcapítulo Antecedentes. Mientras que en el apartado Estado del arte se presenta una síntesis de cada uno de los trabajos que fueron considerados pertinentes para la elaboración de este documento.

5.3.1. Antecedentes

En Estados Unidos, durante los años 50 y 60 surgió la idea de explorar el ciclo de vida de un producto o proceso. La primera mención del concepto fue introducida por Novick (1959) en un informe enfocado en el análisis de costos del ciclo de vida en la RAND Corporation. Inicialmente su aplicación principal fue para entender los costos de los sistemas de armas, teniendo en cuenta no solo el costo de compra y uso sino también el costo final de operación. Con el tiempo el análisis de ciclo de vida se convirtió en una herramienta de gestión de presupuesto en relación con el costo total de propiedad, para ese entonces comenzaron a surgir interrogantes sobre la metodología y la normalización a implementar (Curran, 2012).

El concepto empezó a expandirse tanto en el sector privado que en 1985 un documento encuesta identificó más de 600 estudios de ciclo de vida publicados enfocados en la optimización y rendimiento de los sistemas. A finales de la década de los 80´s se desarrolló el primer análisis de ciclo de vida ambiental como una alternativa competitiva a los Análisis de Costo-Beneficio (CBA) que para 1971 en EE. UU eran de carácter obligatorio para los programas de regulación ambiental. El salto conceptual del ACV de costo al ACV ambiental en los 80´s, pasó a formalizarse en los 90´s gracias al trabajo de las organizaciones ISO y SETAC que permitieron una armonización de los términos, procedimientos y requerimientos de lo que hoy se conoce como ACV (Curran, 2012)

5.3.2. Estado del arte

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se presenta una síntesis de los documentos más relevantes en cuanto a evaluación de impactos durante la producción de panela:
En el año 2004, María Cristina García realizó un estudio titulado *Hornillas paneleras: Evaluación de su impacto ambiental*. La autora expone que en los últimos años ha incrementado la preocupación por la conservación del ambiente, por lo que la sostenibilidad debe ser incluida en toda empresa o actividad productiva. Sin embargo, la legislación ambiental colombiana no cuenta con normas específicas para las diferentes industrias, por lo que este artículo puede ser tomado como punto de partida para la formulación de directrices ambientales y tiene por objeto constituirse como línea base para realizar futuros estudios de evaluación de impacto ambiental de la industria panelera. Para el estudio de impacto ambiental se contemplaron las siguientes etapas: Identificación de las actividades desarrolladas en el proyecto; Determinación de los posibles impactos que pueda generar cada actividad; Identificación del área de influencia del proyecto; Predicción y valoración de los impactos y Estudio y evaluación de las diferentes alternativas para su manejo (García, 2004).

Dentro de los cálculos se obtuvo que la cantidad de energía liberada por una hornilla autosuficiente alimentada únicamente por bagazo en condiciones promedio de operación (90Kg/h de producción de panela, 2Kg de bagazo por 1Kg de panela y 35% de humedad del bagazo) es de 0,74 millones de Kcal/h. Este resultado indica que la cantidad de material particulado permisible para fuentes fijas artificiales debe ser inferior a 3Kg según el Decreto 02 de 1982 (García, 2004).

A partir de estudios previos sobre los parámetros ambientales de la producción de panela, se ajustaron las emisiones de concentración en condiciones promedio. Los resultados revelaron que esta agroindustria genera volúmenes de gases contaminantes relativamente pequeños a comparación con otras industrias, pero que pueden tener altas concentraciones de gases tóxicos como el CO, el cual está por encima de los límites permisibles con las condiciones de operación consideradas (Presidencia de la República de Colombia, 1982). De igual forma, los resultados varían según el tipo de hornilla y combustible, la producción de panela/hora,

el exceso de aire, el tipo de cámara de combustión, entre otros. Por esta razón, el volumen y concentración de gases es muy amplio por lo que se requiere un seguimiento detallado para determinar los factores de emisión de la agroindustria panelera y así construir la norma correspondiente. Este artículo da un primer acercamiento de cómo se debería realizar una evaluación de impacto ambiental de la industria panelera y también da a conocer la importancia de construir una norma basada en el estudio de las condiciones actuales de los sistemas de producción de panela para que los valores establecidos sean factibles de cumplir (García, 2004).

En segundo lugar, se presenta un estudio realizado en el año 2016 titulado *Evaluación teórica del impacto ambiental de una hornilla tradicional para producción de panela*, por los autores Luis F. Gutiérrez M, Sebastián Arias G y Adela M. Ceballos P. A (Gutiérrez, Arias, & Ceballos, 2016). Dichos autores plantean que la elaboración de panela es una actividad que genera un deterioro ambiental causado por la deficiente disposición de los residuos y la operación de combustión de la hornilla. El objetivo del estudio consistió en evaluar el impacto ambiental potencial (PEI) de una hornilla panelera tradicional en el municipio de Supía (Caldas), considerando sus efectos sobre el aire y los ecosistemas acuáticos y terrestres. La evaluación del impacto ambiental fue realizada mediante el algoritmo WAR GUI para cinco producciones de panela en bloque, donde se consideraron tanto datos experimentales como datos reportados en la literatura para establecer el sistema del proceso. Para cada producción se estimaron los potenciales de impacto ambiental (PEI/kg de panela) frente a las categorías de impacto de: Toxicidad por ingestión; por exposición; Toxicidad acuática; Toxicidad terrestre; Calentamiento global; Agotamiento de capa de ozono; Oxidación fotoquímica y Acidificación (Gutiérrez et al., 2016).

Los resultados arrojados por el algoritmo permitieron determinar que la categoría de impacto con el PEI más significativo fue Toxicidad por ingestión, donde existe facilidad de ingesta de los residuos de combustión por personas o animales ya sea directamente o a través de fuentes hídricas, seguido de Oxidación fotoquímica (formación de smog). Ambas tuvieron los índices más altos debido a la mala disposición de residuos (cachaza, material particulado, cenizas e inquemados) generados durante la combustión. A su vez, se estableció que la presencia de CO, NOx y S, aceleran la oxidación fotoquímica, aunque las concentraciones encontradas fueron bajas (2,6%., 0,12%, 0,18% respectivamente) lo que explica el bajo PEI asociado. Por otro lado, los excesos de aire fueron muy fluctuantes entre 116-173%, donde a menor flujo de comburente se presenta una quema más incompleta y una mayor emisión del material particulado. De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda aumentar el flujo de aire en la hornilla, darle un uso potencial a la cachaza y establecer alternativas de control durante la etapa de combustión, esto con el fin de validar futuras mejoras que propicien la sostenibilidad del esquema productivo (Gutiérrez et al., 2016).

Por otro lado, en el año 2017 Castañeda. J, González. A, Usma C & Cano. N realizaron un *Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia*. Debido a la gran producción y demanda de panela que existe en Colombia y teniendo en cuenta que, existen pocos estudios sobre el análisis de ciclo de vida de la panela en el mundo, los autores mencionados elaboraron este artículo con el objetivo de cuantificar las cargas ambientales asociadas a la producción de panela hasta el momento en que esté lista para ser empacada, y adicionalmente, determinar la conveniencia de ciertas mejoras tecnológicas en la fase de manufactura. Esto con el fin de identificar los puntos críticos que requieren optimización para en aras de obtener un proceso más eficiente y sostenible (Castañeda-Suárez, González-Dumar, Usma-Rojas, & Cano-Londoño, 2017).
La concentración de producción de panela se ha dado en pocos países y en condiciones en su mayoría poco tecnificadas, por lo que la aplicación del ACV de dicho producto ha sido nula hasta el momento. Para el desarrollo de este trabajo se aplica la metodología de análisis de ciclo de vida siguiendo la estructura metodológica de la norma ISO 14041, utilizando como herramienta el software Umberto NXT con la base de datos Ecoinvent 3.3.1 y teniendo como unidad funcional una tonelada de panela. Se contemplaron las categorías de impacto: ocupación de tierras agrícolas, agotamiento de metales, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad terrestre, cambio climático, toxicidad humana y formación de material particulado. De acuerdo con los resultados arrojados por el software, la carga ambiental total del proceso fue de 96.57 puntos. Se determinó que las cargas ambientales se concentran en su mayoría en la fase de extracción de materias primas con 51.79 puntos en la categoría de Ocupación de tierras, y se presenta un menor aporte en la fase de manufactura, donde las categorías con mayor impacto fueron Agotamiento de combustibles fósiles (3.12 puntos), debido al uso de combustible Diesel en el motor para la extracción del jugo de la caña y la categoría de Formación de material particulado (2.4 puntos) debido a la liberación de calor y cenizas al ambiente por el uso de leña y/o bagazo para el funcionamiento de las hornillas que evaporan el agua del jugo de caña (Castañeda-Suárez et al., 2017).

Dentro de las recomendaciones para la optimización del proceso en la fase de manufactura se propuso inicialmente utilizar hornillas con gas propano como fuente calor, debido a que su poder calorífico es mayor que el del gas natural, aunque su costo es mayor. Para corroborar la hipótesis de que este cambio reduciría la formación de material particulado, se evaluó nuevamente el proceso con gas propano. Sin embargo, a pesar de que la calidad ambiental mejoró en la categoría, la carga total ambiental aumentó en 0.34 puntos. En la categoría Cambio climático también aumentó la carga ambiental en las dos categorías de agrupación, en Calidad ecosistémica pasó de 7.02 a 8.02 puntos y en Salud humana de 11.1 a 12.69 puntos. Como segunda alternativa se propuso el reemplazo del motor con Diesel por uno eléctrico. Al realizar nuevamente el análisis se obtuvo una reducción de la carga ambiental total del proceso en 3.82 puntos, donde la mayor mejora se observó en la categoría de Agotamiento de combustibles fósiles, pasando de 11.95 a 8.92 puntos. La última alternativa consistió en realizar un análisis al combinar los cambios mencionados anteriormente (gas

propano y motor eléctrico) y resulto ser la alternativa con mayores mejoras, pasando de un impacto total de 96.57 a 90.48 puntos (Castañeda-Suárez et al., 2017).
Como conclusión se tuvo que la mejor alternativa es usar bagazo en las hornillas ya que a pesar de que genera cierta contaminación en la categoría de Formación de material particulado, el uso de gas propano incrementa el impacto en otras categorías e incrementa los costos de producción. Para la fase de molienda resulta ser más conveniente el cambio de motor Diesel por uno eléctrico en términos de cargas ambientales (Castañeda-Suárez et al., 2017).

Por último, Quezada. M, Walter. F, Contreras. A, Domínguez. E, Quezada. D, Molina. A & Rojas. J realizaron un estudio titulado *Environmental Impact Evaluation of the Industry of Panela by Life Cycle Analysis* en el año 2017. Donde establecieron como objetivo general evaluar los impactos ambientales generados por la industria panelera en Ecuador, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida. La agroindustria de la panela se desarrolla en su mayoría en fábricas artesanales donde se descuidan los estándares técnicos, ambientales y de calidad durante todo el proceso. En la actualidad se desconocen los efectos ambientales que genera la agroindustria de la panela, por esta razón el ACV constituye una técnica de gestión que permite evaluar los potenciales aspectos e impactos asociados a las etapas del ciclo de vida del producto. Lo que permite orientar los instrumentos de política ambiental como el fortalecimiento de programas integrados de gestión de residuos y planes de gestión, y contribuye a la toma de decisiones en los sectores sociales e industriales (Quezada, Moreno et al., 2017).
La revisión bibliográfica permitió recopilar información in situ en diferentes empresas en el centro y norte del país. Se estimó que hay más de 519 fábricas de panela en Ecuador. Las unidades que producían combustión se midieron usando el instrumento 4400 y se analizaron fábricas que usaran bagazo, madera y llantas. Para la evaluación ambiental de una unidad productiva que opera con bagazo, se utilizó el método de análisis de ciclo de vida para la producción de 20 t caña/ día. Los niveles de ruido se evaluaron con EXTECH instrumentos que estaban en un rango de 26 a 130 dB. Se realizó control sobre la cantidad de agua vertida midiendo el pH y los sólidos solubles (° Brix). Se hizo un inventario general de toda la cadena productiva teniendo en cuenta la producción de caña, y procesamiento y mercadeo del producto. Los resultados se analizaron usando SimaPro 7.3 y Eco-indicator 99, tomando como unidad funcional 2485 kg de panela (Quezada, Moreno et al., 2017).

Por medio de cálculos estequiométricos se halló el balance de materia y energía de acuerdo con las entradas y salidas del sistema. Los resultados muestran que para producir 2485 kg de panela se requieren 880 kg de bagazo para la combustión y se generan 1530 litros de agua residual. El pH de las aguas residuales variaba entre 4.64-5.11 y 2.10 y la cantidad de sólidos solubles entre 2.10-11.3 ° Brix. El nivel de ruido en el punto de las máquinas fue de 83.42dB que excede el límite permisible de ruido dentro de una zona industrial (75dB). Los gases como CO y NO se generaron en menores cantidades cuando se utiliza bagazo en vez de leña.

La emisión de gases (CO y NO) también se encontró en altas cantidades en el motor del equipo debido a que tiene uso superior a 15 años. El análisis del software determinó que la etapa industrial contribuye en un 94% a los impactos ambientales del proceso. La puntuación superior se encontró en la Calidad del ecosistema de acuerdo con las categorías de acidificación/eutrofización y uso de la tierra, le sigue los Recursos Humanos y Salud por compuestos inorgánicos y el cambio climático y en tercer lugar se encuentran el Uso de los recursos por la utilización de combustible para el transporte y la electricidad (Quezada, Moreno et al., 2017).

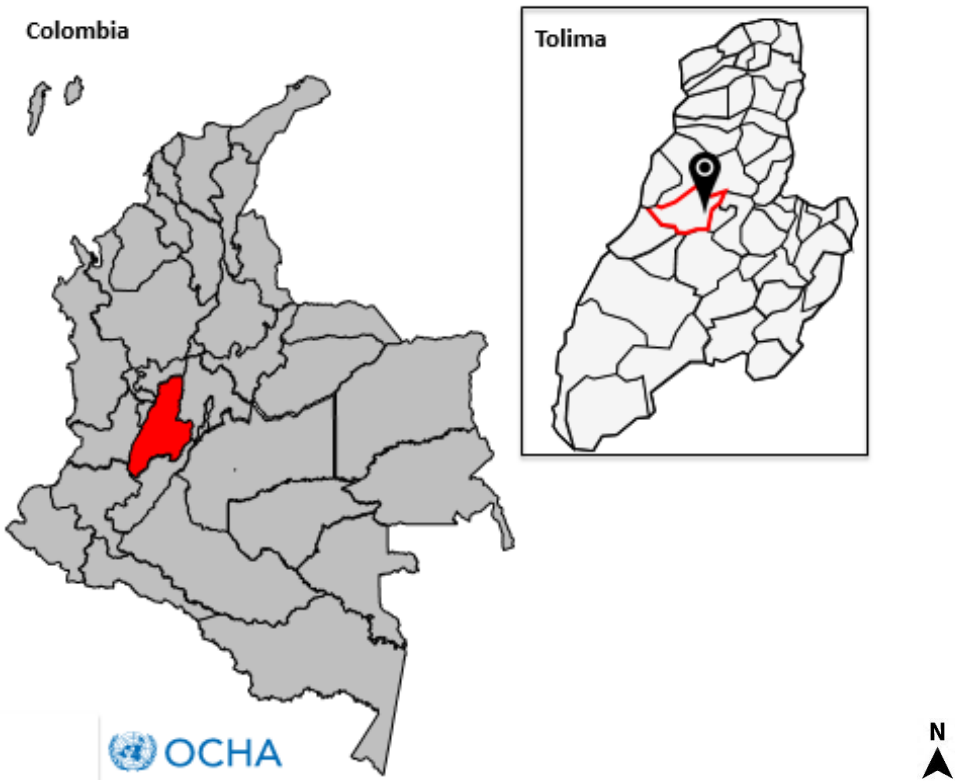
En conclusión, la agroindustria de la panela en Ecuador es una actividad considerada de bajo impacto por ser en su mayoría de carácter artesanal. Sin embargo, los impactos ambientales de esta actividad afectan la sostenibilidad del proceso especialmente cuando no se ejecuta un adecuado tratamiento y uso de los residuos que produce. Esto revela la necesidad de encontrar oportunidades de mejora enmarcadas en la producción más limpia que aseguren el progreso, productividad, calidad y seguridad en pro su sostenibilidad (Quezada, Moreno et al., 2017).

5.4. Marco geográfico

En este apartado se presenta la zona geográfica donde se ubica el objeto de estudio, se especifica la ubicación por medio de mapas de apoyo y se destacan los aspectos relevantes a tener en cuenta (Ramírez, 2008).

El municipio de Rovira se encuentra ubicado en el departamento de Tolima (Colombia). Sus coordenadas geográficas son 4°14’ Latitud norte y 75°14’ Longitud oeste. Limita por el norte con Ibagué, por el occidente con Cajamarca, por el oriente con San Luis y Valle de San Juan y por el sur con Roncesvalles, Ortega y San Antonio. Tiene una altura de 850 msnm, una temperatura de 24°C y precipitación media anual de 1.848 mm (Secretaría de Planeación de Rovira, 2011).

Figura 2. División político-administrativa de Tolima



Fuente: (OCHOA, 2018)

De acuerdo con las proyecciones de población 2005-2020 realizadas por el DANE, el número de habitantes del municipio para el año 2018 es de 20.349 (DANE, 2011). El municipio de Rovira cuenta con una extensión de 736.60 km^2, de los cuales el 99,86% (735,57 km^2) constituyen el sector rural y sólo el 0,14% (1,04 km^2) el área urbana. Hay 15 barrios en su área rural y 1 centro poblado y 82 veredas en la zona rural. A continuación, se presentan los respectivos límites veredales (Secretaría de Planeación de Rovira, 2011):

La agricultura es la actividad más importante del municipio ya que vincula el mayor número de habitantes. De acuerdo con la (Secretaría de Planeación de Rovira, 2011), el municipio cuenta con 68.949 ha, de las cuales 63.326 pertenecen al área rural. Existen cerca de 62 trapiches distribuidos en todo el municipio y ubicados en la parte baja donde se encuentran la mayoría de los cultivos de caña. La panela es la única actividad agroindustrial del municipio a la que se le da un valor a la materia prima. La mayoría de la producción se comercializa en el municipio, pero también se distribuye a Playa Rica e Ibagué. Por otro lado, La vereda La Chapa se encuentra a 12 km y 30 minutos de la cabecera municipal del municipio de Rovira. Tiene una extensión de 1419.22 Ha y cuenta con una población de 337 habitantes ubicados en 72 viviendas y 70 fincas o predios productivos. El cultivo principal de esta vereda es el café, le siguen en orden el plátano, la caña panelera y la yuca, también cuenta con ganadería extensiva. En la vereda hay 3 trapiches con 26 Ha de caña sembrada en

total. Uno de estos trapiches ubicado en la finca "Las Camelias" será tomado como objeto de estudio para este proyecto de investigación (Bonilla, 2001).

5.5. Marco Institucional

En este marco se enuncian las instituciones o integrantes donde se enmarca el estudio, refiriéndose a su participación y compromisos (Ramírez, 2008).

El lugar de estudio para esta investigación es la finca Las Camelias, ubicada en el Km 70 vía Ibagué-Rovira costado este. La finca posee 12 Ha destinadas al cultivo de caña de azúcar. La producción de panela se realiza cada mes con un periodo de 3 días consecutivos y la jornada laboral tiene una duración de 15 horas comenzando desde la 1:00 am hasta las 5:00 pm con una hora de descanso. Dentro del área construida se encuentra el trapiche panelero y la vivienda de los propietarios. La fabricación y venta de la panela constituye la única actividad económica desarrollada en la finca. El cultivo de caña de azúcar se encuentra a escasos metros del trapiche por lo que los tallos son transportados en mula de carga. Para la elaboración de la panela se requieren 10 trabajadores dentro de los cuales se encuentran: Un supervisor, tres operarios del molino, un pasador del bagazo, dos operarios de la hornilla y la concentración de la panela, dos encargados del batido, moldeo y empaque y un limpiador. Al finalizar el proceso de fabricación, el producto final es llevado al punto de venta a 3Km de la finca.

5.6. Marco normativo

El marco legal nos proporciona las bases sobre las cuales se construyen y determinan el alcance y naturaleza de cualquier organización y de igual manera permite establecer los parámetros establecidos para diferentes tipos de actividades y así verificar que se tenga el cumplimiento legal vigente (Ramírez, 2008). En este trabajo investigativo se identificaron las normas aplicables al proceso de producción de panela en Colombia. Esto con el fin de determinar las condiciones de la empresa estudiada en cuanto a emisiones por fuentes fijas, vertimientos, medias sanitarias, conservación de recursos naturales y el medio ambiente. Adicional a esto, se expone la normatividad de carácter voluntario que se debe tener en cuenta para la realización del análisis de ciclo de vida.

5.6.1. Normatividad colombiana

Decreto 2811 de 1974: "Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Artículo 1. El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social".

Este código tiene por objeto lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables. También busca prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos

naturales no renovables sobre los demás recursos. Y pretende regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la Administración Pública respecto al ambiente (Presidencia de la República de Colombia, 1974).

Ley 9 de 1979: "Por la cual se dictan medidas sanitarias". Esta ley tiene por objeto establecer "a) Las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en relación con la salud humana; b) Los procedimientos y medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del ambiente" (Congreso de la República de Colombia, 1979).

Decreto 2 de 1982: "Por el cual se reglamentan parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas". Este Decreto establece las normas de calidad del aire, donde según el tipo de contaminantes se presentan los valores máximos de concentración en condiciones de referencia. De igual forma se realizan especificaciones para fuentes fijas y móviles y según el tipo de industria generadora de emisiones atmosféricas (Presidencia de la República de Colombia, 1982).

Decreto 1594 de 1984: "Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos".
De acuerdo con el Artículo 70 los subproductos provenientes de la producción de panela como lodos, cenizas, cachaza y bagazo requieren una disposición según la normatividad de residuos sólidos: "Los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deber cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos"(Presidencia de la República de Colombia, 1984).

Constitución política de 1991: "El pueblo de Colombia, en ejercicio de su poder soberano, representado por sus delegatarios a la Asamblea Nacional Constituyente, invocando la protección de Dios, y con el fin de fortalecer la unidad de la Nación y asegurar a sus integrantes la vida, la convivencia, el trabajo, la justicia, la igualdad, el conocimiento, la libertad y la paz, dentro de un marco jurídico, democrático y participativo que garantice un orden político, económico y social justo, y comprometido a impulsar la integración de la comunidad latinoamericana, decreta, sanciona y promulga la siguiente constitución política de Colombia" (Presidencia de la República de Colombia, 1991).

"Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber

del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines" (Presidencia de la República de Colombia, 1991).

Ley 99 de 1993: "Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones" (Congreso de la República de Colombia, 1993).

Ley 115 de 1994: "Por la cual se expide la ley general de educación". "ARTICULO 1o. Objeto de la ley. La educación es un proceso de formación permanente, personal, cultural y social que se fundamenta en una concepción integral de la persona humana, de su dignidad, de sus derechos y de sus deberes" (Congreso de la República de Colombia, 1994).

Decreto 948 de 1995: "Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire". Debido a que la agroindustria panelera genera emisiones atmosféricas durante su proceso productivo, este decreto es aplicable ya que tiene por objeto "definir el marco de las acciones y los mecanismos administrativos de que disponen las autoridades ambientales para mejorar y preservar la calidad del aire, y evitar y reducir el deterioro del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana ocasionados por la emisión de contaminantes químicos y físicos al aire; a fin de mejorar la calidad de vida de la población y procurar su bienestar bajo el principio del desarrollo sostenible" (Presidencia de la República de Colombia, 1995).

Decreto 901 de 1997: Durante la producción de panela se generan subproductos que se convierten en vertimientos, por tal motivo este decreto es aplicable ya que tiene por objeto "reglamentar las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales" (Presidencia de la República de Colombia, 1997b).

Decreto 3075 de 1997: "Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 09 de 1979 y se dictan otras disposiciones" Este decreto regula todas las actividades que puedan generar factores de riesgo por el consumo de alimentos (Presidencia de la República de Colombia, 1997).

Resolución 779 de 2006: "Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para consumo humano y se dictan otras disposiciones". Esta resolución tiene por objeto "establecer el reglamento técnico a través del cual se señalan los requisitos sanitarios que deben cumplir los establecimientos denominados trapiches paneleros y centrales de acopio

de mieles procedentes de trapiches que fabriquen, procesen, envasen, transporten, expendan, importen, exporten y comercialicen la panela con destino al consumo humano, en el territorio nacional, con el fin de proteger la salud y la seguridad humana y prevenir las prácticas que puedan inducir al error a los consumidores" (Ministerio de Proteccion Social de Colombia, 2006).

5.6.2. Normatividad de carácter voluntario

NTC-ISO 14040:2006: Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Principios y Marco de Referencia. Esta norma detalla los requisitos para desarrollar un análisis de ciclo de vida (ACV) tratando los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto. Incluye: a) Definición del objetivo y alcance del ACV; b) Fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV); c) Fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV); d) Fase de interpretación del ciclo de vida; e) Informe y revisión crítica del ACV; f) Limitaciones del ACV; g) Relación entre las fases del ACV y h) Las condiciones de utilización de juicios de valor y elementos opcionales. Sin embargo, no describe la técnica ACV en detalle ni especifica metodologías para las fases individuales (ICONTEC, 2006).

NTC-ISO 14044:2007: Gestión Ambiental, Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Esta norma abarca dos tipos de estudio: el análisis de ciclo de vida y el análisis del inventario de ciclo de vida, estos últimos se diferencian de los primeros porque excluyen la fase de EICV. Describe los principios y el marco de referencia para el análisis del ciclo de vida incluyendo: a) Definición del objetivo y alcance del ACV; b) Fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV); c) Fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV); d) Fase de interpretación del ciclo de vida; e) Informe y revisión crítica del ACV; f) Limitaciones del ACV; g) Relación entre las fases del ACV y h) Las condiciones de utilización de juicios de valor y elementos opcionales (ICONTEC, 2007).

NTC-ISO 14001:2015: Sistema de Gestión Ambiental. Requisitos. Esta norma proporciona a las organizaciones un marco para proteger el ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes guardando un equilibrio con las necesidades socioeconómicas. Especifica los requisitos para establecer un Sistema de Gestión Ambiental que permita a la empresa conseguir los resultados deseados. Esta norma tiene como requisito que las empresas identifiquen todos los aspectos ambientales considerando la perspectiva del ciclo de vida al implementar el SGA (ICONTEC, 2015).

6. Metodología

6.1. Enfoque, alcance y método de investigación

Esta monografía da un acercamiento a la realidad intersubjetiva del proceso productivo de la panela desde un enfoque mixto, es decir, se presentan realidades objetivas desde el enfoque cuantitativo y subjetivo desde el enfoque cualitativo. En primer lugar, el enfoque cualitativo se encuentra determinado por las interacciones sociales y las tradiciones culturales. Mientras que el enfoque cuantitativo se refiere a las variables y datos necesarios para desarrollar el ACV. Según Goedkoop et al. (2016) los estudios de análisis de ciclo de vida tienen un enfoque cuantitativo, debido a que para su realización es necesaria la recolección de datos de la empresa y su proceso, la medición de variables como flujos de masa y energía y el análisis de las mediciones obtenidas por medio de métodos estadísticos. En segundo lugar, también se tiene un enfoque cualitativo debido a que durante la fase de interpretación del ACV y la propuesta de mejoras del proceso productivo, el autor realiza una acción indagatoria entre los hechos y su interpretación, lo cual proporciona profundidad a los datos y contextualización del entorno estudiado (Hernández Sampieri Roberto, 2014).

El alcance de este proyecto es de tipo descriptivo debido a que busca especificar las propiedades y características del análisis de ciclo de vida de la producción de panela, por medio de la recolección de datos en la fase del inventario de ciclo de vida de manera conjunta, con el fin de detallar cómo se manifiesta el proceso productivo en un trapiche panelero del municipio de Rovira (Hernández Sampieri Roberto, 2014). Por otro lado, el método de este estudio es de carácter deductivo debido a parte de lo general al estudiar el sistema productivo y va a lo particular al analizar los impactos ambientales que se generan a partir de cada una de las entadas significativas del proceso (Ramírez, 2008).

6.2. Marco metodológico

En este apartado se plantean las técnicas e instrumentos que se van a utilizar en la investigación ya sea en campo, en el laboratorio y en el análisis de la investigación. Se establece el enlace entre lo que se quiere lograr y cómo lograrlo, por lo que se debe existir una integración entre los objetivos, la toma de datos y el análisis de la información (Ramírez, 2008). A continuación, se presentan las metodologías implementadas para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos:

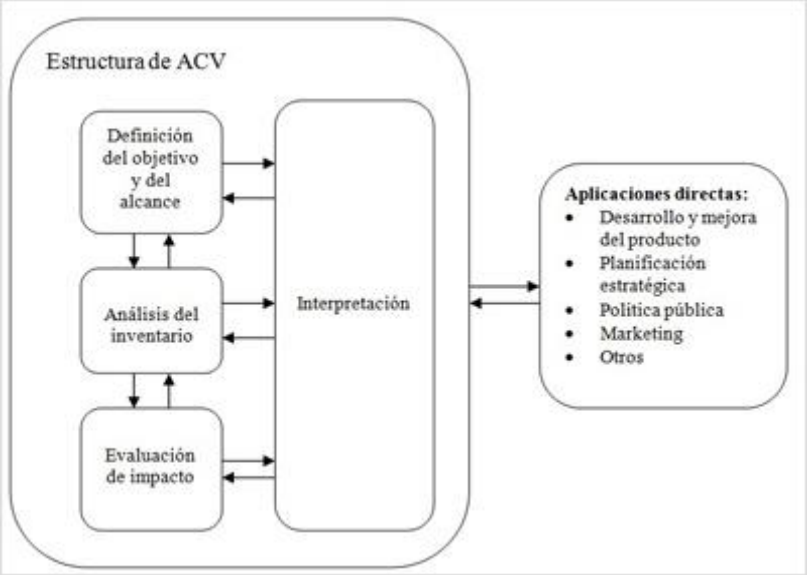
6.2.1. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico 1

El primer objetivo específico consiste en “Elaborar un Análisis de Ciclo de Vida de la etapa de producción de la panela en un trapiche panelero ubicado en el municipio de Rovira (Tolima)”, para el cumplimiento de este objetivo fue necesario seguir los principios de la NTC-ISO 14040:2006 y los requisitos y directrices de la NTC- ISO 14044:2007, tomando

como referente teórico el libro *Life Cicle Assessment Handbook* de la autora Mary Ann Curran (2012), donde enfoca la metodología del ACV a la industria de alimentos y 2 artículos encontrados sobre el ACV de la panela, en Ecuador (Quezada, Moreno et al., 2017) y Colombia (Castañeda-Suárez et al., 2017).

Para el cumplimiento de este objetivo se siguió el esquema presente en la figura 3, donde se muestran cada una de las etapas del ciclo de vida: Definición del objetivo y alcance del ACV; Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV); Evaluación del inventario del ciclo de vida (EICV) e Interpretación de los resultados.

Figura 3. Fases del ACV



Fuente: (ICONTEC, 2006, fig 1)

Inicialmente se hizo una visita técnica el día 17 de septiembre de 2018 en las instalaciones del trapiche para el reconocimiento de la zona de estudio. La observación directa y las entrevistas a trabajadores y propietarios permitieron determinar cada una de las variables cualitativas para tener en cuenta en el esquema detallado del ciclo de vida del proceso productivo. Para la etapa inicial del ACV, en primer lugar, se definió el **objetivo** del estudio donde se tuvo en cuenta la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y el público previsto. En el **alcance** del estudio se consideró y describió el sistema del producto bajo estudio, las funciones del sistema del producto, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, la metodología de la EICV y los tipos de impactos, la interpretación a utilizar, los requisitos relativos a los datos, los juicios de valor y elementos opcionales, las limitaciones, los requisitos de calidad de los datos y el tipo y formato del informe requerido para el estudio.

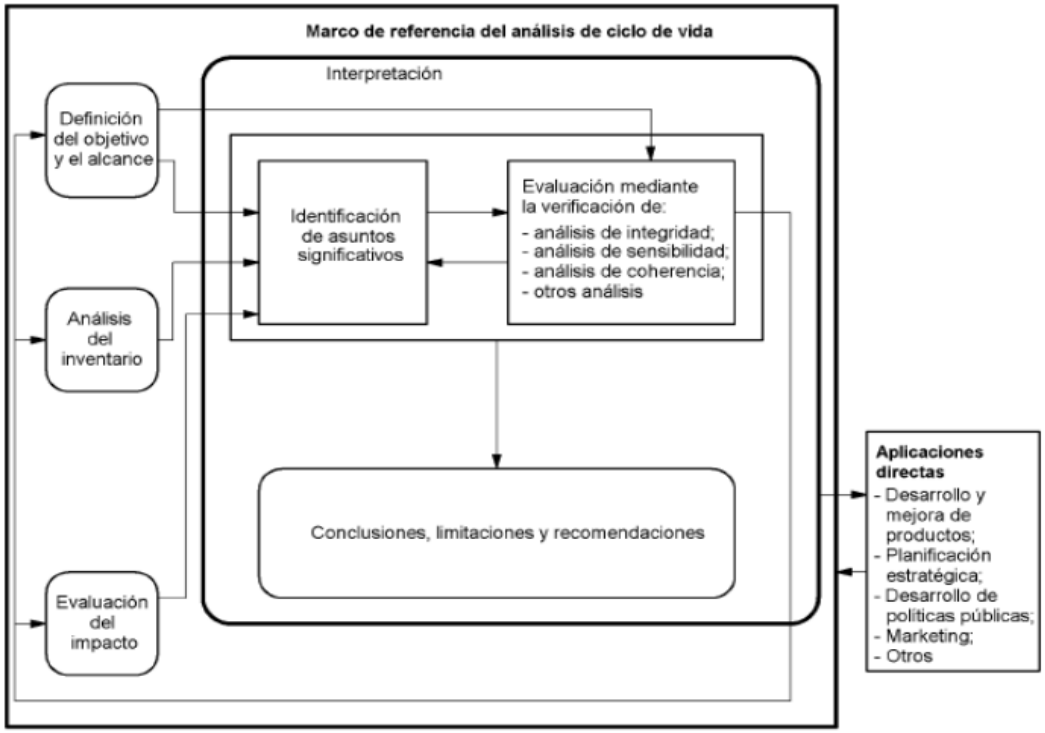
Durante el **Análisis del inventario** se especificaron cada una de las variables cuantitativas y cualitativas de los procesos unitarios del sistema. En esta fase se realizó la recopilación de datos primaria mediante literatura encontrada del proceso y mediciones de volúmenes, pesos,

temperaturas y ° Brix. El cálculo de los datos de entrada y salida del proceso se obtuvo mediante un balance de masas y de energías del sistema. Con esta información se logró realizar la representación gráfica del sistema mediante un diagrama de flujo. Por último, los datos recopilados se incorporaron en SimaPro, donde se obtuvo la información secundaria presente en las bases de datos del software.

La fase de **Evaluación del inventario del ciclo de vida** fue desarrollada en SimaPro, allí se seleccionaron las categorías de impacto y modelos de caracterización, la asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas y el cálculo de los resultados de los indicadores de categoría. Estos resultados fueron presentados mediante gráficas, tablas y diagramas arrojados por el mismo software.

Finalmente, la **Interpretación del ciclo de vida** consistió en la identificación y discusión de los asuntos significativos basados en las fases anteriores, se realizó la verificación de los análisis de sensibilidad, integridad y coherencia y se desarrollaron las conclusiones, limitaciones y recomendaciones del ACV, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4. Fase de interpretación de resultados



Fuente: (ICONTEC, 2007, fig 4)

6.2.2. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico 2

Con la culminación del objetivo específico uno, se procedió a "Generar una propuesta de recomendaciones desde la gestión ambiental de acuerdo con los puntos críticos establecidos en el análisis de ciclo de vida". Teniendo en cuenta los impactos significativos arrojados por SimaPro, se realizaron las recomendaciones a partir de las Buenas Prácticas de Manufactura

y en segunda instancia a partir de la adopción de medidas tecnológicas. Por otra parte, se realizó un análisis de viabilidad técnica y económica, para corroborar si la propuesta puede ser tenida en cuenta para la futura toma decisiones por parte de los propietarios del trapiche en pro de la disminución de impactos ambientales y a favor de la optimización del proceso productivo.

7. Resultados y discusión

7.1. Resultados del objetivo específico 1

7.1.1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV de la etapa de producción de la panela

7.1.1.1. Objetivo del ACV

El objetivo de este estudio consiste en evaluar los impactos ambientales generados durante la etapa de producción de la panela en un trapiche panelero del municipio de Rovira (Tolima). La aplicación de este proyecto es de tipo académico por lo que los resultados estarán disponibles para cualquier persona interesada en temas relacionados con el análisis de ciclo de vida del producto de estudio.

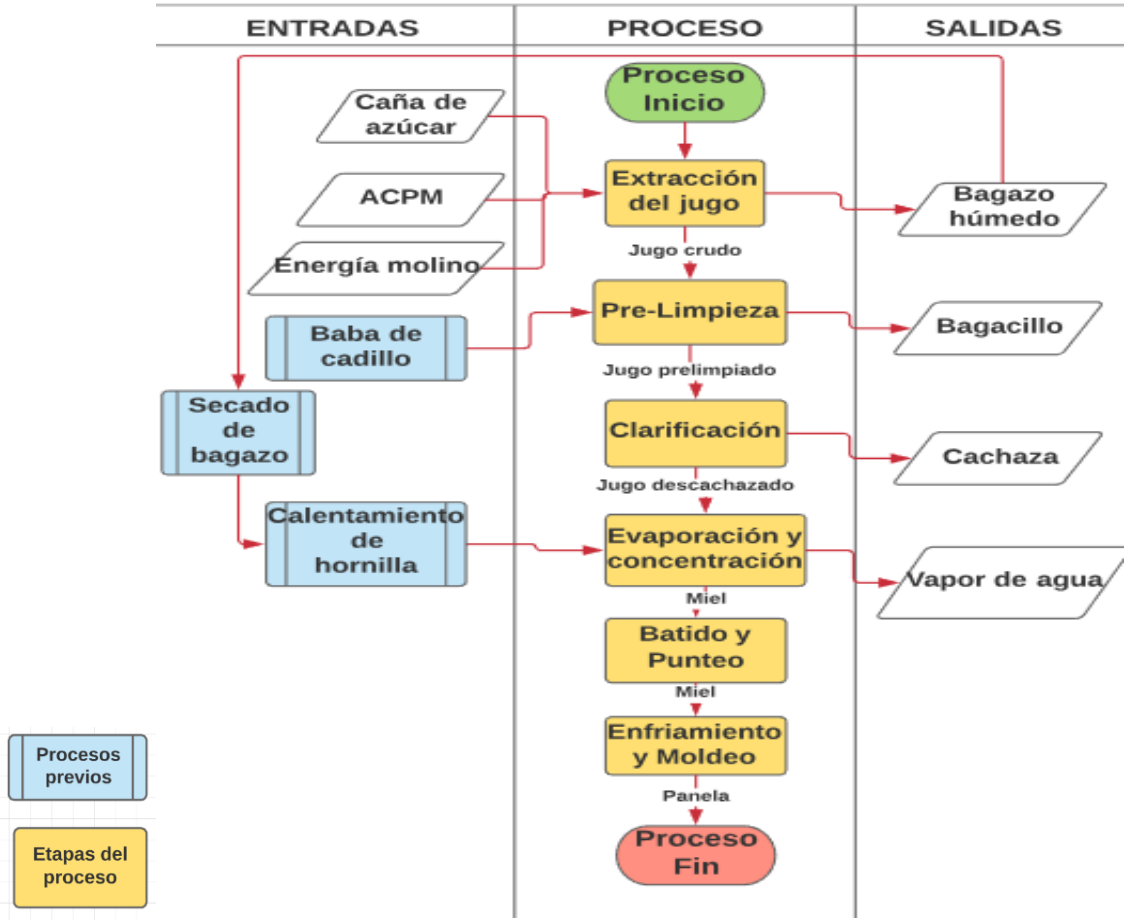
Uno de los principales motivos para realizar esta investigación, se debe a que no se tiene suficiente información cuantificable sobre las cargas ambientales y las repercusiones que genera la producción de panela. A su vez, se espera que la propuesta de recomendaciones desde la gestión ambiental con base en los puntos críticos identificados sirva de apoyo para la toma de decisiones futuras por parte de los propietarios del trapiche panelero.

7.1.1.2. Alcance del ACV

Autores como Quezada. W et al (2017) definieron la unidad funcional (UF) con base en la producción diaria de panela en Ecuador correspondiente a 2485 kg y Castañeda. J et al. (2017) tomaron la magnitud estándar de producción utilizada en los trapiches de Colombia que es 1 Ton. Sin embargo, para este proyecto de investigación se tomó como UF 1kg de panela justo antes de ser empacada, debido a que es una de las presentaciones estándar por unidad en el mercado a nivel nacional. Para este estudio se definieron cada uno de los procesos que componen el sistema de producción de la panela: Extracción del jugo; Pre-Limpieza; Clarificación; Evaporación y Concentración; Batido y Punteo; Enfriamiento y Moldeo.

A continuación, se presenta un diagrama de flujos como ayuda visual para el claro entendimiento del sistema de producción:

Figura 5. Diagrama de flujos del sistema



Fuente: Elaborado por autor

En la finca las Camelias se cultiva la caña de azúcar que constituye la materia prima principal del proceso productivo. El cultivo se encuentra a pocos metros del trapiche, por lo que los tallos son transportados en mulas de carga hasta la instalación.

Figura 6. Recepción de la caña de azúcar

Fuente: Elaborado por autor

Los tallos se disponen para el proceso de **Extracción del jugo** mediante un molino que funciona con ACPM, en esta etapa se obtiene el jugo crudo y bagazo húmedo. Este último se somete a un proceso de secado para que posteriormente pueda ser utilizado como combustible en la hornilla.

Figura 7. Extracción del jugo

Fuente: Elaborado por autor

La **Pre-Limpieza** consiste en pasar el jugo a través de una tubería dirigida a los fondos o pailas, para que por medio de decantación se retiren manualmente la mayor cantidad de impurezas o bagacillo posibles por la sedimentación de partículas pesadas, las cuales más adelante son mezcladas con las cenizas que genera la hornilla con el fin de realizar compostaje.

Figura 8. Pre-Limpieza

Fuente: Elaborado por autor

Los fondos de diferentes tamaños y alturas son calentados mediante una hornilla que es alimentada por bagazo seco que a su vez genera emisiones atmosféricas y cenizas. Aquí inicia el proceso de **Clarificación**, donde a los fondos se les adiciona manteca vegetal para evitar que el producto se queme y aglutinante vegetal (baba de cadillo), esta acción combinada de

calor y aglutinante produce una espuma con impurezas flotantes que son extraídas manualmente. La primera capa que se retira es llamada cachaza negra y la segunda capa que es más liviana cachaza blanca, con estas impurezas se fabrica un subproducto de la elaboración de panela llamado “melote”, empleado para alimentación bovina.

Figura 9. Clarificación

Fuente: Elaborado por autor

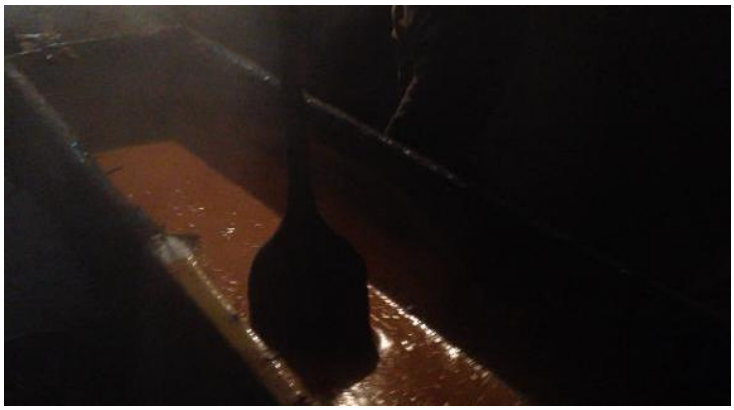
Cuando las pailas elevan su temperatura hasta aproximadamente 97,1°C inicia la **Evaporación y Concentración**, donde se elimina cerca del 90% de agua hasta obtener una miel lo suficientemente viscosa y la concentración de los sólidos apropiada.

Figura 10. Evaporación y Concentración

Fuente: Elaborado por autor

La miel es llevada a otro recipiente y se realiza un **Batido** manual hasta alcanzar la consistencia o **Punto** deseado.

Figura 11. Batido y punteo



Fuente: Elaborado por autor

Posterior a ello se lleva la mezcla a gaveras cuadradas para su **Moldeo** y se deja en **Enfriamiento** hasta conseguir el máximo estado de compactación.

Figura 12. Moldeo y Enfriamiento

Fuente: Elaborado por autor

Para el correcto cálculo de las cargas ambientales se identificaron otras variables que en los estudios encontrados de ACV de la panela no se han tenido en cuenta e influyen en elaboración del producto. Se utiliza electricidad durante 15 horas para iluminar el trapiche. Antes de la elaboración de la panela se deben tener todos implementos y lugar de trabajo limpios, por lo que se utiliza detergente en polvo, hipoclorito de sodio y abundante agua. Durante el proceso también se utiliza el recurso hídrico para lavar los utensilios, fondos y el pozuelo de la Pre-Limpieza mínimo una vez al día, esto con el fin de evitar la fermentación de los jugos y garantizar la calidad de la panela. Adicional a esto, es importante señalar que el trapiche no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que los vertimientos se depositan aguas abajo de la quebrada.

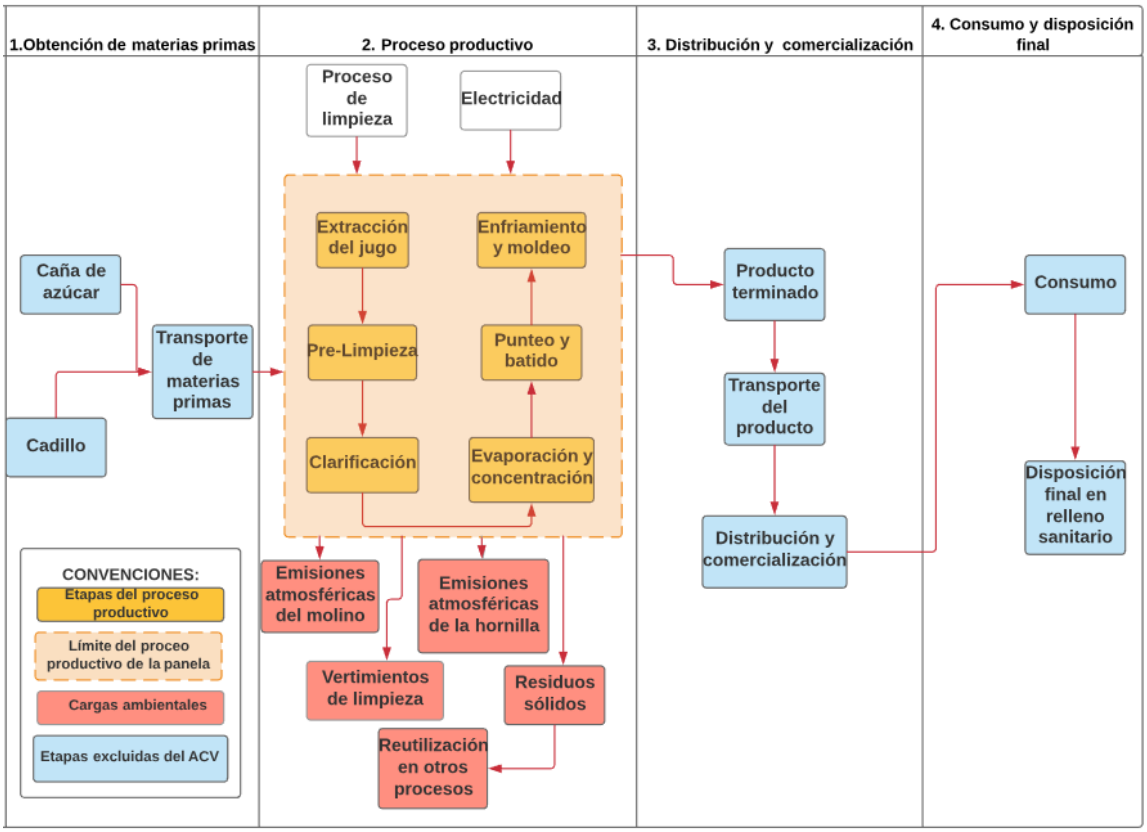
Figura 13. Limpieza de utensilios

Fuente: Elaborado por autor

El ACV es "puerta a puerta" es decir, considerando únicamente la etapa productiva de la panela. Desde que la caña llega al trapiche, pasando por el proceso de elaboración hasta el momento en que está lista para ser empacada. Este ciclo de vida excluye las fases posteriores como la distribución y transporte del producto, el uso y/o consumo y la disposición final. De igual forma también excluye las fases anteriores a la producción de la panela como la obtención o adquisición de materias primas, la adecuación de tierras, la preparación del suelo, la selección de variedad de la caña, la siembra, la maduración y cosecha y el corte, recolección y transporte de la caña.

La limitación de este proyecto a ciertas fases se debe a la gran variedad de métodos de ejecución de las otras etapas por lo que existe una diferencia en la magnitud de los impactos y el estudio busca ser lo más representativo posible en cuanto al proceso de producción de panela tradicional. En la figura 13 se agrupan las cuatro etapas que componen el ciclo de vida de la panela, de acuerdo con: la obtención de materias primas; la transformación del proceso productivo; la distribución y comercialización del producto y su disposición final. A su vez se presenta el sistema del producto dentro de la etapa de transformación del proceso y sus límites. Se debe tener en cuenta que para los vertimientos se consideró la salida de agua sin incluir su carga contaminante y se descartaron los flujos relacionados a la maquinaria al ser un limitante para la realización de este proyecto.

Figura 14. Sistema del producto y sus límites



Fuente: Elaborado por autor.

El enfoque utilizado para modelar los flujos de asignación es el de expansión del sistema, los subproductos provenientes de la elaboración de la panela son aprovechados en su totalidad. El bagazo se incorpora nuevamente el sistema como combustible y el melote es empleado para alimentación bovina. Por esta razón, las cargas ambientales de los subproductos se otorgan en un 100% al sistema que produce el material reciclado, en este caso la elaboración de panela suministra la materia prima de los sistemas posteriores. El sistema es analizado como "Caja negra" es decir, de forma general donde los insumos y residuos del proceso son tomados como entradas y salidas y no como un sistema completo (Curran. M, 2012).

De acuerdo con la NTC-ISO 14044, para el inventario de ciclo de vida se pueden incluir una mezcla de datos medidos, calculados o estimados. En este caso, la mayoría de los datos fueron recopilados en el sitio de producción con los propietarios y trabajadores por medio del formato presentado en el Anexo A. Sin embargo, al no llevar un registro anual de insumos, se comparó la información con los artículos encontrados del ACV de la panela y así reducir la incertidumbre del estudio. Se realizaron mediciones de: los ° Brix y temperatura mediante equipos de laboratorio (refractómetro y termopar respectivamente) para realizar los cálculos del calor suministrado a hornilla y la cantidad de jugo que sale del molino y se pesaron algunas salidas del sistema como la cachaza y el bagacillo (Ver Anexo C).

Por otro lado, se utilizaron las bibliotecas del software SimaPro 8.5.2 que fueron consideradas las más apropiadas para el proyecto. Se eligieron las bases de datos Ecoinvent 3.3 y Agri-footprint, debido a que disponen procesos en diversos sectores como energía, productos químicos, productos de lavado, agricultura y gestión de residuos (Goedkoop, Oele, Leijting, Ponsioen, & Meijer, 2016). Para la EICV, al igual que los autores Quezada et al (2017), se utilizó el método Eco-indicator 99 ya que se ajusta a las categorías de impacto más relevantes de la fabricación de la panela, tales como: Salud Humana; Calidad del Ecosistema, Recursos, Calentamiento Global, Acidificación y Eutrofización del suelo.

7.1.2. Inventario del ciclo de vida de la panela:

7.1.2.1. Datos de primer plano

Los datos de primer plano constituyen los datos específicos de referencia para consolidar la información del sistema. Estos fueron obtenidos a partir de entrevistas a los trabajadores y mediciones directas en el trapiche, lo cual permitió realizar los cálculos del balance de masas y energías presentes en el Anexo C.

Para garantizar la calidad de los resultados se midieron ° Brix del jugo y miel por medio de un refractómetro. La temperatura del jugo, la miel, el ambiente y la ebullición del jugo se midió con un termopar. Los resultados promediados se presentan a continuación:

Tabla 1. Resultados de mediciones de ° Brix y temperatura

Producto	**° Brix**	**Temperatura °C**
Jugo	23,28	26
Miel	91,50	115
Temperatura ambiente °C		25
Temperatura de ebullición del jugo °C		97,10

Fuente: Elaborado por autor.

La UF se determinó con base en 1 kg de 1470 kg panela que se producen en una jornada laboral de 15 horas.

$$UF = 1\ Kg\ de\ panela$$

$$Factor\ de\ conversión = \frac{1}{1470\ kg\ panela}$$

De esta forma fue posible obtener la cantidad de insumos necesaria para fabricar 1 kg de panela. A continuación, se presenta el inventario global de producción, donde se muestran las cantidades iniciales y las calculadas respecto a la unidad funcional a partir del factor de conversión:

Tabla 2. Inventario global de producción de 1kg de panela

Entradas					
Insumo	Cantidad en kg/jornada laboral	Factor de conversión	Cantidad por UF	Unidad	Observación
Caña	17010	0,00068027	11,571429	Kg/kg panela	Caña orgánica, sin uso de fertilizantes. No certificado.
ACPM	16,4666		0,011202	Kg/kg panela	Combustible del molino. Densidad: 870 Kg/m3
Energía del motor	751,47135		0,511205	MJ/kg panela	Energía requerida para extraer el jugo.
Baba de cadillo	60		0,040816	Kg/kg panela	Compuesto por: 83,33% agua +16,66% cadillo.
Energía hornilla	11053,176		7,519167	MJ/kg panela	Energía aprovechada por la hornilla.
Hipoclorito de sodio	0,4		0,0002721088	Kg/kg panela	Utilizado para limpieza de utensilios y equipos.
Detergente en polvo	0,888		0,000604082	Kg/kg panela	Utilizado para limpieza de utensilios y equipos.
Recurso hídrico	2058,0473		1,400032	m3/kg panela	Llega por gravedad directamente del río.
Electricidad	7,14		0,004857143	KWh/kg panela	Se utilizan 7 bombillos para iluminar el trapiche.

Fuente: Elaborado por autor.

En un comienzo se pretendía medir la temperatura en 3 puntos clave de la hornilla como lo establece el "Protocolo para la medición de la temperatura, emisión de gases y determinación de eficiencia energética en hornillas tradicionales de Gualivá", presente en el proyecto de grado de (Escobar, 2016). Sin embargo, los datos tomados en campo no tuvieron validez, debido a que el termopar no reconocía las temperaturas superiores a los 200°C a pesar de que las indicaciones del equipo de laboratorio presentaban un rango de hasta 1300°C. Por estos motivos, fue necesario calcular las emisiones generadas por la hornilla a partir los factores de emisión estandarizados por la EPA de acuerdo con las características del trapiche (Zambrano, 2005).

7.1.2.2. Datos de segundo plano

Los datos secundarios son aquellos que no están específicamente relacionados con el sistema del producto y se derivan de la literatura y de las bases de datos genéricas del Inventario de Ciclo de Vida (Curran, 2012). Para la selección de bases de datos se escogieron aquellas bibliotecas que contenían los procesos y sectores productivos que se ajustaran más al ciclo

de vida de la panela. Castañeda et al (2017) eligieron únicamente Ecoinvent 3.3.1 en el software alemán Umberto NXT. Sin embargo, para el desarrollo de este ACV los datos secundarios se obtuvieron de las bibliotecas del software SimaPro y se eligieron aquellas que contaran con las características de los procesos, materiales, transformaciones, fuentes de energía y transporte, más representativos para la creación del nuevo proyecto. A continuación, se presenta la Tabla 3 con la descripción de cada una de las bases de datos escogidas:

Tabla 3. Descripción de bases de datos

Biblioteca	Descripción
Ecoinvent 3.4	Posee más de 10.000 conjuntos de datos interrelacionados de ACV de diversos sectores como la producción, energía, transporte, materiales de construcción, producción de productos químicos, metales, frutas y hortalizas.
Agri-footprint 4.0	Contiene inventarios de procesos unitarios vinculados a cultivos, procesamiento de cultivos y productos animales y sistemas de producción animal. También incluye datos de inventario, transporte, producción de fertilizantes y materiales auxiliares.

Fuente: Elaborado por autor con base en (PRé Consultants, 2018)

Para garantizar la calidad de los datos y teniendo en cuenta que aún no se tiene una variable específica de **electricidad mixta** del país en SimaPro, dicha información fue adaptada a Perú, por ser el país latinoamericano con mayor similitud a Colombia. En la Tabla 6 se presenta la Matriz energética Perú-Colombia, donde se observa la comparación entre ambos países en cuanto a la producción y porcentaje según las fuentes de energía. Tanto Perú como Colombia cuentan con distintas variables, pero cabe resaltar que el 80% de energía en Colombia se debe al recurso hídrico lo que lo constituye como un país dependiente de una única fuente, mientras que Perú tiene mayor diversidad de fuentes con altos porcentajes como lo son el gas natural con un 19,24%, el carbón con un 25,93% y el recurso hídrico con un 48,47% (M. P. Hernández & Duque, 2014).

Tabla 4. Matriz energética Perú-Colombia

Fuente	Perú		Colombia	
	Producción (GWh)	Porcentaje (%)	Producción (GWh)	Porcentaje (%)
Gas natural	91354	19,24	1132,7	3,95
Biogás	1978	0,42	51.,2	0,18
Recurso Hídrico	230189	48,47	23009,6	80,32
Carbón	123127	25,93	772,9	2,70
Eólica	18423	3,88	1054,1	3,68
Solar	9805	2,06	241	9,17
Total, producción	474876	100	28646,8	100

Fuente: Proyecto de grado de (M. P. Hernández & Duque, 2014)

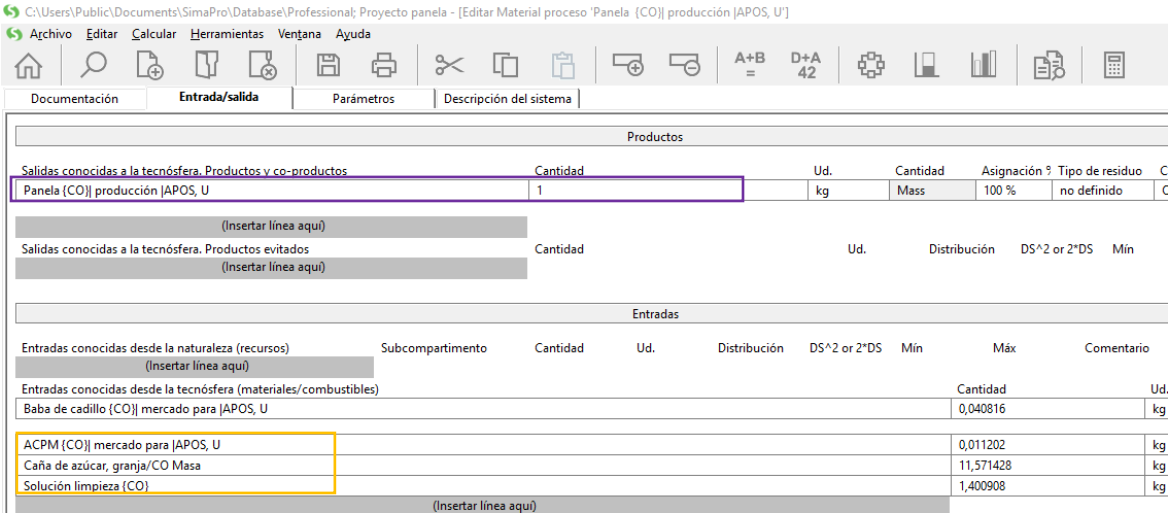
De igual forma, fue necesario modificar y crear los materiales y procesos que posteriormente se iban a convertir en las entradas del material creado “Panela {CO}| producción |APOS, U”. En SimaPro se modificaron materiales y procesos con base en la matriz energética creada para Colombia y en algunas bases de datos que existían del país {CO} como el tipo de fuente hídrica.

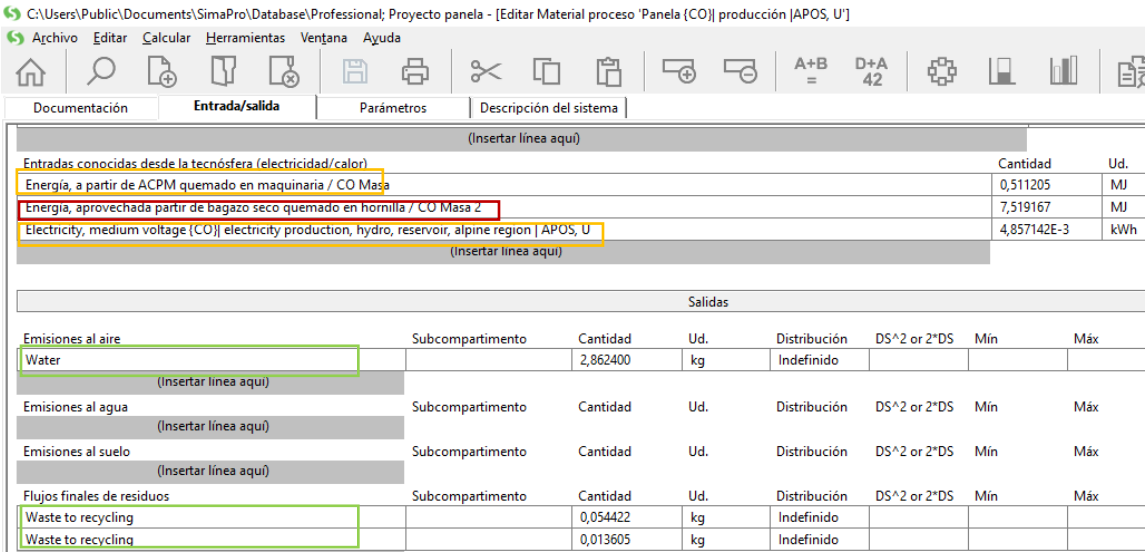
La **baba de cadillo** no se encuentra en el software por lo que se creó un material compuesto de 83,33% agua y 16,66% de cadillo (Triumfetta Lappula). En el caso del **cultivo de caña de azúcar** se tuvo que modificar la información del país a las características de la finca Las Camelias, dado que los agricultores no utilizan ningún tipo de producto para la protección de cultivos y por ende dichos valores de entradas y salidas del proceso fueron modificados. En otros casos como la **gasolina, energía del motor y solución de limpieza**, fue necesario adaptar la información con base en los datos estándar a nivel global {GLO} y en el resto del mundo {RoW}, para que la información no estuviera delimitada a un área geográfica en particular. Los elementos **agua evaporada y material reciclado** por su parte, fueron tomados directamente de SimaPro dado que no se encuentran regionalizados.

Las bases de datos presentes en el software no contaban con información similar a la fabricación de la panela. El proceso más próximo es la fabricación de azúcar a partir de caña. Sin embargo, los datos encontrados eran de carácter industrial y no tenían mayor relación con el proceso de carácter artesanal estudiado. Por estos motivos, fue necesario crear los materiales y procesos relacionados a la **energía térmica de la hornilla**.

En la Figura 14, se pueden observar los procesos y materiales creados y modificados en el software que se ingresaron para crear 1 kg de panela

Figura 15. Procesos creados y modificados





Fuente: Elaborado por autor.

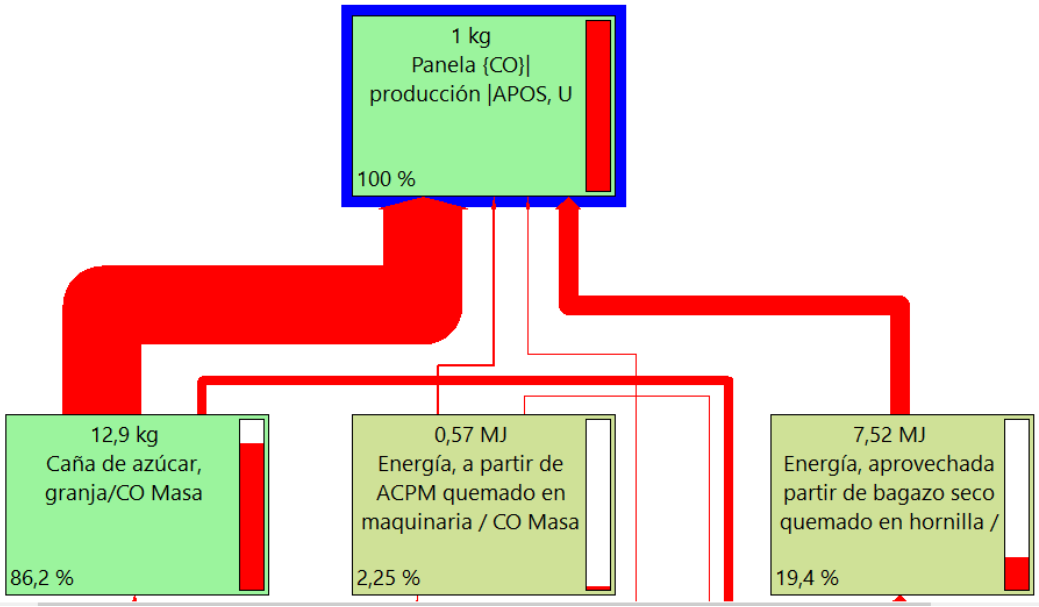
Convenciones:
Morado: Nombre del proceso y unidad funcional
Verde: Material/Proceso de SimaPro
Amarillo: Material/Proceso modificado
Rojo: Material/Proceso creado

7.1.3. EICV de la panela:

Durante la fase de Evaluación de impactos del ciclo de vida todas las entradas y salidas identificadas en el ICV se relacionan con sus consecuencias ambientales y se evalúa su impacto, obteniendo como resultado un perfil de impacto ambiental del ciclo de vida del proceso. De acuerdo con la NTC-ISO 14044:2007, las categorías de impacto juegan un papel muy importante en la evaluación de impactos debido a que representan los asuntos ambientales de interés a los que se le pueden asignar los resultados del análisis de ciclo de vida (ICONTEC, 2007).
Castañeda. J et al (2017) utilizaron las categorías de impacto: ocupación de tierras agrícolas, agotamiento de metales, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad terrestre, cambio climático, toxicidad humana y formación del material particulado presentes en el método ReCiPe del software Umberto NXT. Para este estudio, al igual que Quezada. W et al (2017) se utilizó Eco-indicator 99 (H), debido a que evalúa los efectos intermedios (midpoints) que mejor representan el objetivo y alcance del ACV estudiado. Analiza tres tipos de daño, dentro de los cuales se agrupan en total 11 categorías de impacto: 1) Salud humana, se expresa como el número de años vida perdidos y número de años vida por discapacidades, estas se combinan como años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) (Cambio climático, Disminución de la capa de ozono, Efectos cancerígenos, Respiración de partículas inorgánicas, Respiración de partículas orgánicas, Radiación ionizante); 2) Calidad de los ecosistemas, expresado como la pérdida de especies en un área y tiempo determinados

(Ecotoxicidad, Acidificación/eutrofización, Uso del suelo) y 3) Los recursos donde se obtiene la energía excedente necesaria para futuras extracciones para recursos minerales y fósiles (Uso de minerales y Agotamiento de combustibles fósiles) (PRé Consultants, 2000).

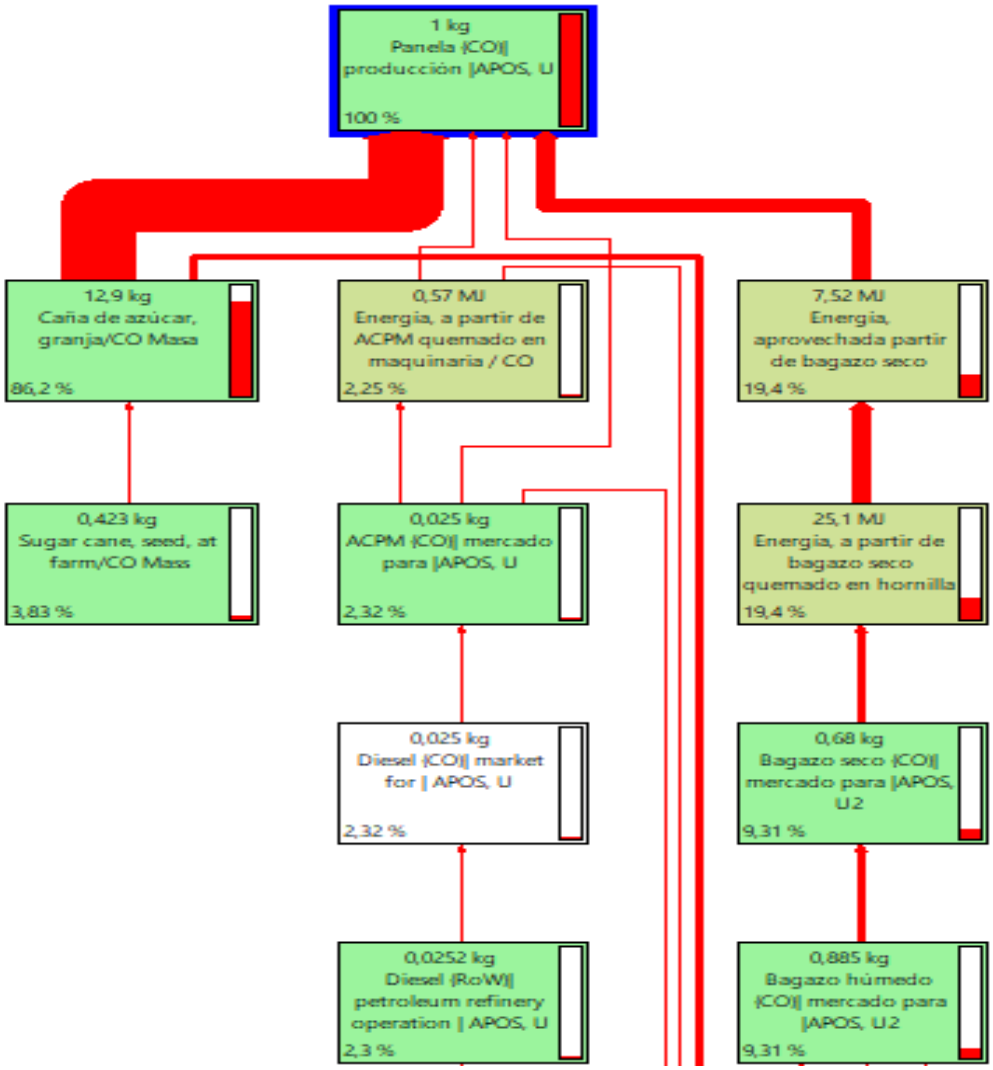
Figura 16. Elementos de primer nivel del diagrama de red



Fuente: Elaborado por autor

El cálculo de la evaluación de impactos es arrojado por SimaPro de diversas formas. El diagrama red muestra los resultados en porcentaje o en valores absolutos y las relaciones de los procesos. Varía el porcentaje de contribución según el grado en que los procesos presenten mayor o menor impacto ambiental y varía también la parte de la red observada según el nivel de detalle que se elija. En la figura 19, se puede visualizar el diagrama de red con un nivel de detalle de 2,3%, donde se presentan los materiales y procesos con mayor % de contribución de impacto ambiental.

Figura 17. Diagrama de red del proceso productivo de la panela

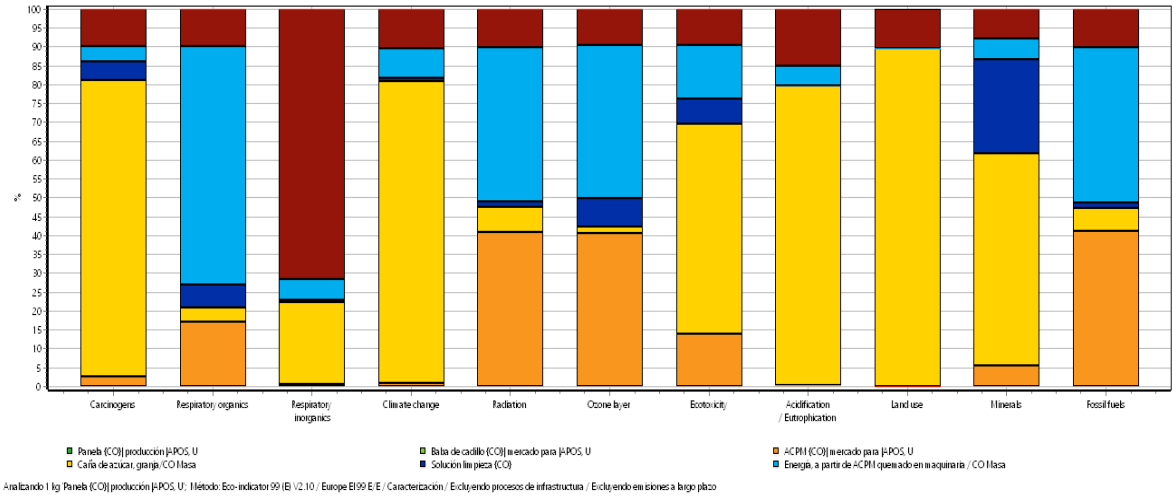


Fuente: Elaborado por autor

La figura anterior presenta el diagrama de red con un nivel de detalle de 0,12%, lo cual permite evidenciar la contribución de otros elementos que antes no eran visibles por su puntuación relativamente baja en comparación con los otros materiales y procesos.

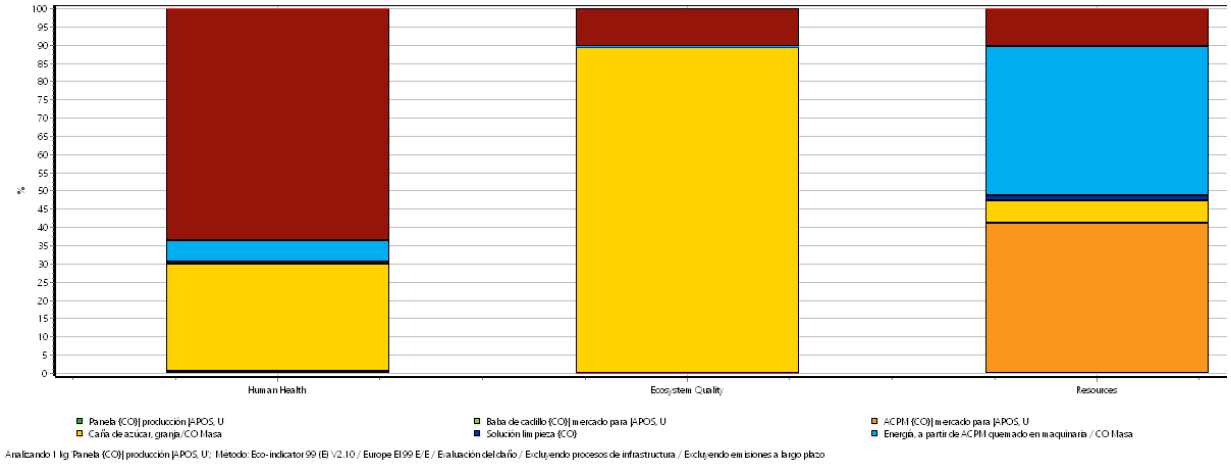
Teniendo un panorama más amplio del diagrama se puede determinar el origen de cada elemento. Se evidencia que en primer lugar se encuentra la Caña de azúcar con un 86,2% de contribución a las categorías de impacto. Le sigue la Energía aprovechada a partir de bagazo con un 19,4%, donde el 9,31% se debe a la utilización de bagazo seco como combustible, el cual proviene de la etapa de extracción del jugo de caña. La Energía a partir de ACPM quemado en el motor aporta un 2,25% y la Solución de Limpieza un 0,267% del total de cargas ambientales.

Figura 18. . Caracterización del ciclo de vida de la etapa producción de la panela



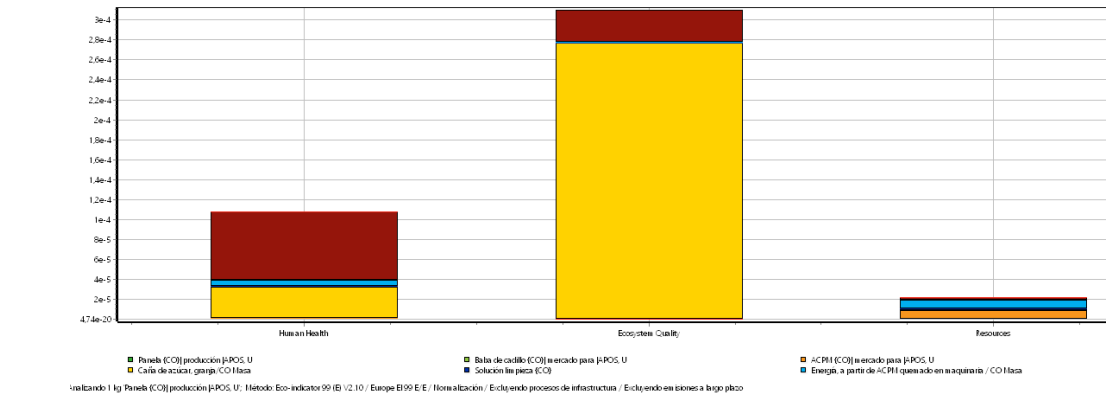
Fuente: Elaborado por autor

Figura 19. Evaluación del daño del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela



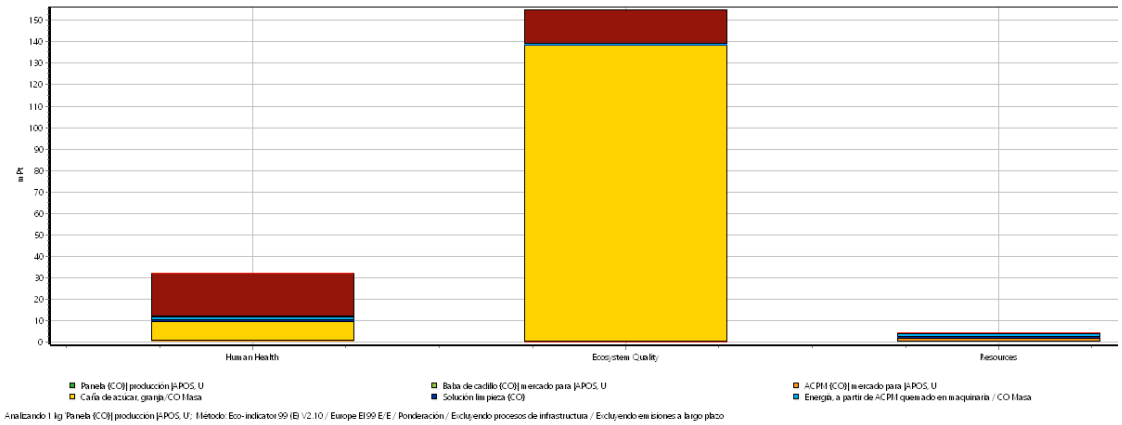
Fuente: Elaborado por autor

Figura 20. Normalización del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela



Fuente: Elaborado por autor

Figura 21. Ponderación del ciclo de vida de la etapa de producción de la panela



Fuente: Elaborado por autor

La herramienta "Analizar" permite calcular la Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida según el tipo de diagrama de barras. La **caracterización** cuantifica los impactos y traduce los datos del inventario a las categorías de impacto. Esta gráfica refleja que la caña de azúcar tiene la mayor contribución relativa en 6 de las 11 categorías de impacto, tales como: Agotamiento de minerales; Uso/Transformación del suelo; Acidificación/Eutrofización; Ecotoxicidad; Cambio climático y Sustancias carcinogénicas. Mientras que la energía a partir del bagazo seco es la que más contribuye a las Afectaciones respiratorias por partículas inorgánicas y la energía a partir de ACPM a las Afectaciones respiratorias por partículas orgánicas. En cuanto al Agotamiento de combustibles fósiles, Radiación Ionizante y Agotamiento de la capa de ozono tienen un aporte similar por el ACPM y la energía a partir de ACPM.

En la **Evaluación del daño** se puede considerar que para la categoría agrupación de Calidad de los ecosistemas, la caña de azúcar tiene un mayor porcentaje de carga ambiental (89,2%), seguido de la energía a partir de bagazo seco (10,5%). Para la categoría de Recursos se tiene un mayor aporte del ACPM y la energía a partir de ACPM (con un 41,2% cada uno), le sigue la energía a partir de bagazo seco (10,2%) y en menor medida la caña de azúcar (6,09%) y la solución de limpieza (1,37%). En la categoría de Salud humana se presenta un significativo aporte por la energía a partir de bagazo seco (63,6%), continuando con la caña de azúcar (29,2%) y finalizando con la energía a partir de ACPM (5,97%)

La **normalización** define el grado en que las categorías de agrupación contribuyen a la carga ambiental total del proceso. En la **ponderación** se le asigna un peso a cada impacto ambiental, lo que representa la gravedad relativa de ese impacto y le da una unidad comparable. En ambos casos, la Calidad de los ecosistemas es la categoría más representativa en su mayoría por la caña de azúcar con un puntaje de ponderación de 138 de 155 mPt (midpoint), seguido de la Salud humana por la energía a partir del bagazo seco con 20,4 de

32,2 mPt y por último los Recursos en menor proporción con un valor de 1,75 de 4,26 mPt para ACPM y energía a partir de ACPM cada uno. Estos resultados guardan una estrecha relación con el estudio de (Quezada, Moreno et al., 2017), debido a que los autores obtuvieron el mismo orden de importancia en las categorías de agrupación, donde la mayor puntuación fue en Calidad del ecosistema, seguido de Salud humana y por último Recursos.

Otros factores que no se han tenido en cuenta en los estudios encontrados de ACV de la panela fueron la iluminación y limpieza del área de trabajo. Sin embargo, la solución de limpieza creada a partir de hipoclorito de sodio, detergente en polvo y en su gran mayoría agua de origen natural, aportó el 0,267% de las cargas ambientales. Mientras que la electricidad de medio voltaje fue el elemento con menor puntación del sistema con tan sólo el 9,58E-6%.

La categoría con mayores aportes de impactos ambientales totales de la producción de panela es Calidad de los ecosistemas, en su gran mayoría por la caña de azúcar. Lo cual era de esperar debido a que como se vió en el ICV, la caña de azúcar es el insumo con mayor cantidad requerida para fabricar 1kg de panela. Este resultado concuerda con el de (Castañeda-Suárez et al., 2017), dado que las cargas ambientales del proceso calculadas con Umberto NXT se concentran en la fase de extracción de materias primas en la categoría de impacto de Ocupación de tierras con puntaje de 51,79 de un total del proceso 96,57 puntos.
A pesar que en Las Camelias el cultivo es de tipo orgánico, se requiere del uso de combustibles fósiles y fertilizantes para la producción de la semilla de caña. Estos factores junto con la gran extensión de tierra para el establecimiento del cultivo explican su alta contribución de impacto. La contribución de esta materia prima no sólo se ve reflejada en la producción de panela sino también en otros alimentos que se fabrican a partir de la caña. Autores como (Herrera, De La Rúa, & Lechón, 2015), indican que los factores que más contribuyen a la emisión de gases efecto invernadero son la fabricación de fertilizantes, la aplicación de fertilizantes nitrogenados y el uso de combustibles en labores de cultivo, riego y recolección para la fabricación de bioetanol. Por otro lado, (Companioni Rojas, 2009) reconoce que el impacto de la etapa agrícola predomina en la mayoría de categorías para la fabricación de azúcar crudo, presentando un puntaje de 6,94E6 de 1,75E7 puntos analizados con el software SimaPro 7.

7.1.4. Interpretación de los resultados

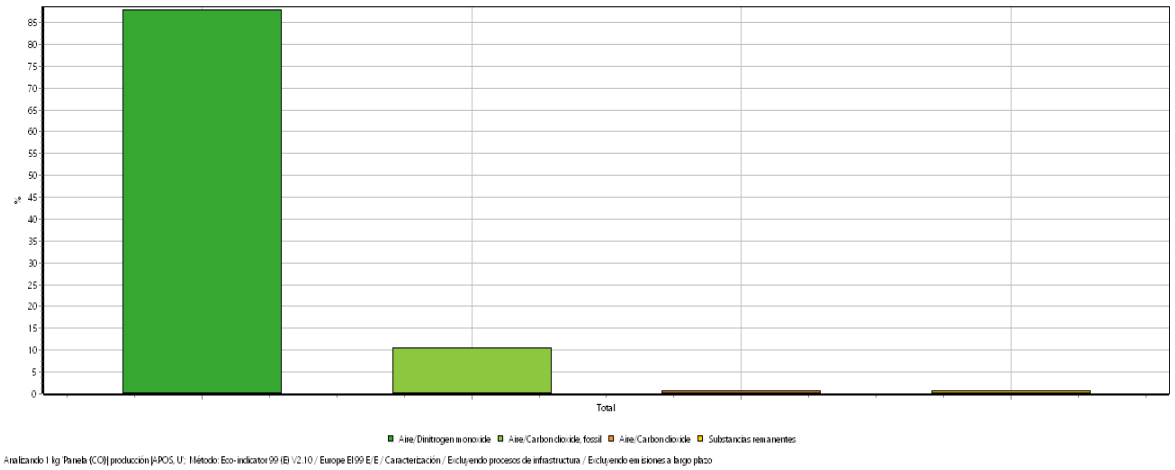
7.1.4.1. Identificación de los asuntos significativos

En este apartado, se deben determinar cuáles son los asuntos que tienen mayor incidencia en los resultados del ICV y el EICV. Por lo que a continuación se presenta el análisis de las categorías de impacto según las sustancias más relevantes con el fin de identificar los puntos críticos de la producción de panela.

- **Salud humana:** En este apartado, se presentan los daños a la salud humana calculados a partir del número y duración de enfermedades y años de vida perdidos por causas ambientales.

Cambio climático

Figura 22. Análisis de categorías según sustancias, Cambio climático



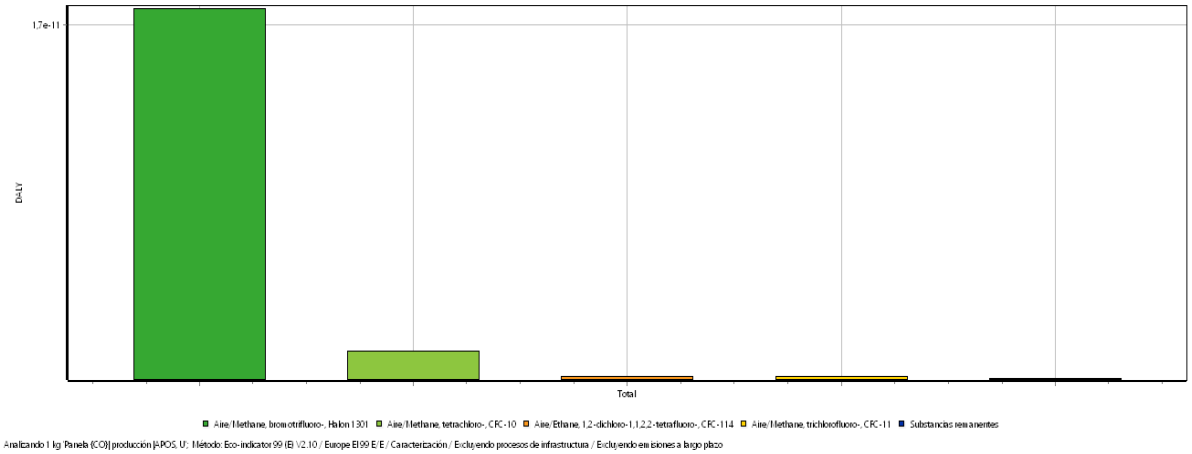
Fuente: Elaborado por autor

El mayor aporte al cambio climático se debe a la presencia de N_2O en el aire (87,9%) principalmente por la caña de azúcar, seguido de la quema del bagazo. El óxido nitroso contribuye con cerca del 6% de la formación de efecto invernadero y su principal fuente son los suelos agrícolas (Benavides & León, 2007). Autores como (Herrera et al., 2015) coinciden en que la emisiones de N2O son generadas en su mayoría durante la etapa del cultivo de caña y por el uso de fertilizantes nitrogenados, mencionan además que esto se debe a la actividad bacteriana propia del suelo y la causa de su incremento es la fertilización. Siendo estos resultados similares a los de (Castañeda-Suárez et al., 2017) donde la fase de materias primas presenta un mayor porcentaje de contribución al cambio climático.

Por otro lado, se encuentra una cantidad significativa de CO2 (10,6%) en el aire por la producción y consumo de ACPM en el motor para la extracción del jugo y en menor medida por la quema bagazo. De acuerdo con (Benavides & León, 2007), el CO2 es el segundo gas más importante en cuanto al calentamiento global y se emite principalmente por el consumo de combustibles fósiles. Mientras que las emisiones N2O y CO2 por el uso del bagazo se producen por su combustión incompleta en la cámara de combustión de la hornilla (Osorio, 2007).

Disminución de la capa de ozono

Figura 23. Análisis de categorías según sustancias, Disminución capa de ozono



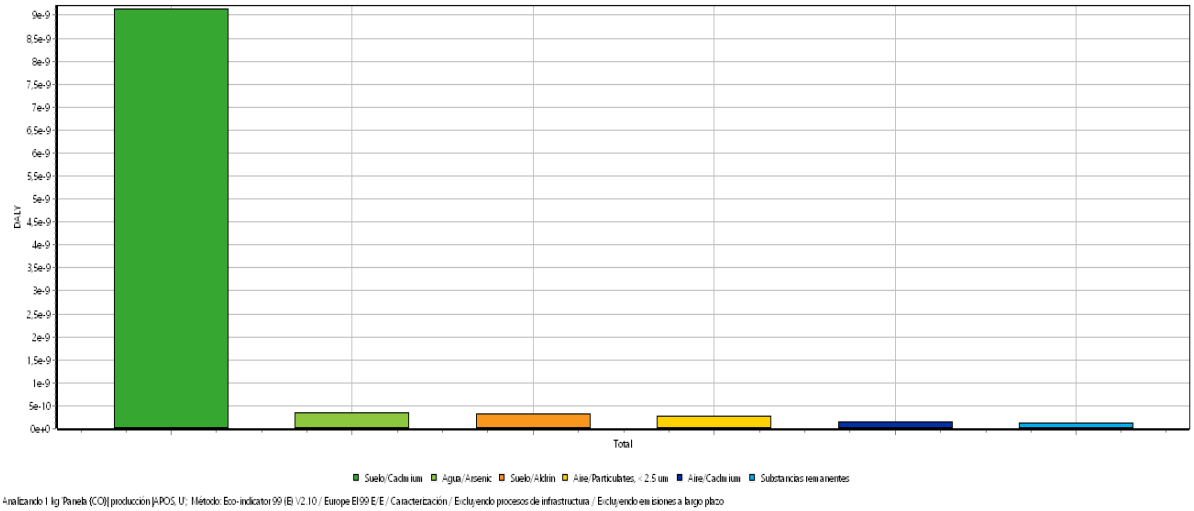
Fuente: Elaborado por autor

La sustancia que más contribuye a la posible disminución de la capa de ozono es el bromotrifluoruro de metano (90,3%) por el uso y producción de ACPM. Los fluorocarburos han sido utilizados como refrigerantes, disolventes, agentes expulsores y productos químicos intermedios de polímeros. De acuerdo con el Protocolo de Montreal, este gas incoloro una de las sustancias agotadoras del ozono estratosférico, el cual protege a la tierra de los efectos de la radiación ultravioleta solar (Comisión de Salud Ocupacional, 2002).

Otra sustancia presente es el tetracloruro de metano (7,11%), el cual ha sido utilizando en ciertas aplicaciones industriales como agente de desinfectante, lo que explica su alto contenido en la solución de limpieza. Al ser liberado al ambiente se moviliza rápidamente en el aire y puede tener una vida media entre 30-100 años, cuando se degrada forma sustancias químicas que pueden destruir de la capa de ozono (ATSDR, 2016).

Efectos cancerígenos

Figura 24. Análisis de categorías según sustancias, Efectos cancerígenos



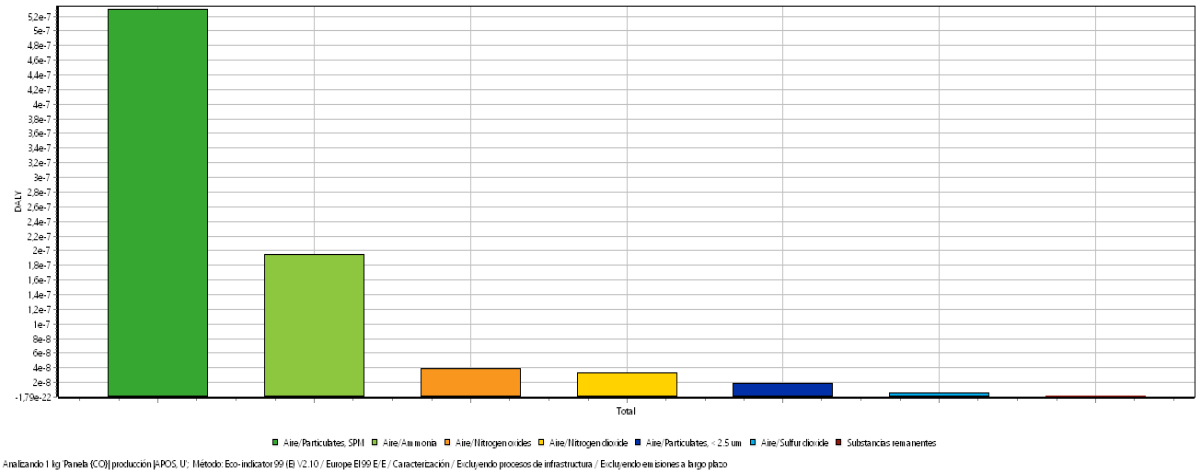
Fuente: Elaborado por autor

Se puede observar que el carcinógeno con mayor presencia es el cadmio en el suelo (88,3%), su alta presencia en el cultivo de caña se debe a que en general se une fuertemente a la materia orgánica. Esta sustancia perteneciente a la categoría 1B está relacionada con el cáncer de pulmón, cuyo riesgo para el hombre ha sido otorgado con base a la existencia de pruebas en animales (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, 2012).

En menor medida se encuentran otras sustancias como el aldrin en el suelo (3,17%), el arsénico en el agua (2,36%) y las partículas < 2.5µ en el aire (1,83%). Sin embargo, la IARC ha determinado que el aldrín no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, 2007). Por otro lado, la OMS explica que hay una relación directa entre las partículas<2.5µ y el riesgo de contraer cáncer de pulmón, mientras que el agua con arsénico tiene mayor relación con el cáncer de vejiga (OMS, 2018).

Respiración de partículas inorgánicas

Figura 25. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas inorgánicas

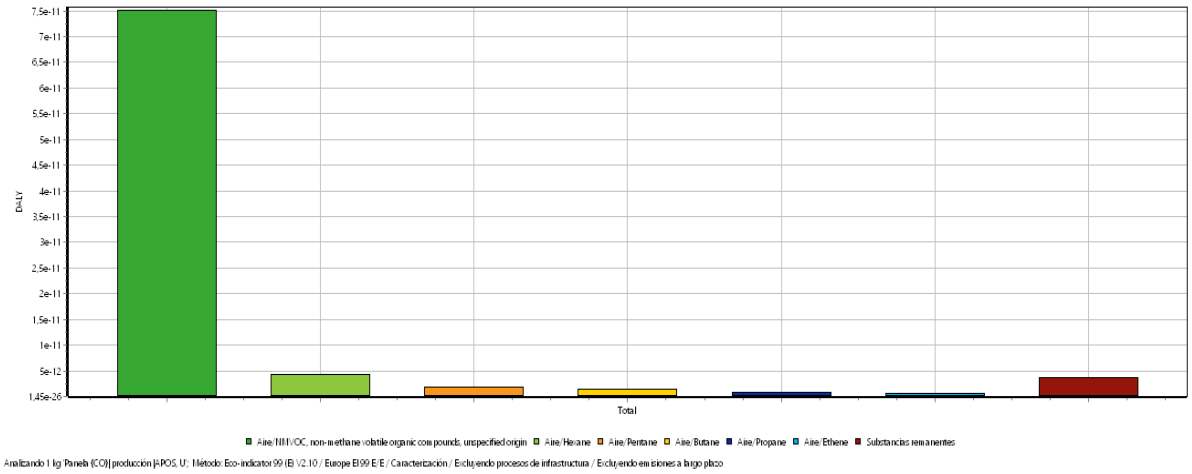


Fuente: Elaborado por autor

Este resultado coincide con el de (Companioni Rojas, 2009) en cuanto a que el mayor efecto en la categoría de respiración de partículas inorgánicas se encuentra dado por la cogeneración de bagazo principalmente por la emisión de material particulado (64,2%) y en menor cantidad de NO2 (4,07%), mientras que el NO (4,79%) se produce en su mayoría por la combustión del motor. Estos gases de combustión son potencialmente riesgosos para la salud del ser humano, ya que pueden generar asma ocupacional, bronquitis, irritación de mucosas e intoxicación (Guerrero & Luengas, 2013). Por otro lado, en el cultivo de caña se encuentra amoniaco (23,7%), el cual proviene de fertilizantes nitrogenados amoniacales y de abono en descomposición y genera efectos negativos en el sistema respiratorio y digestivo por contacto directo (ATSDR, 2016a).

Respiración de partículas orgánicas

Figura 26. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas orgánicas

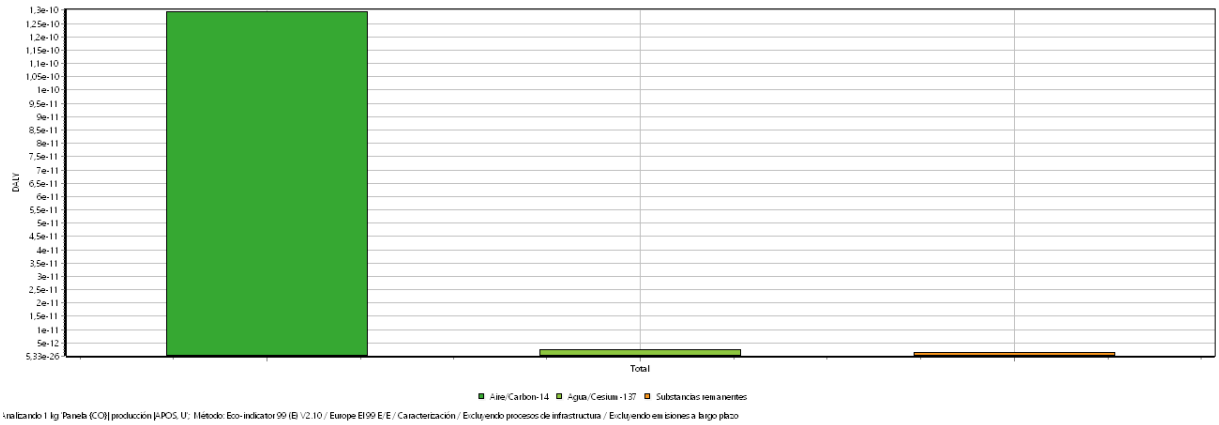


Fuente: Elaborado por autor

En el caso de respiración de partículas orgánicas la mayor contribución se debe en su gran mayoría a compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, COVDM, en el aire (85,4%) y en menor proporción se encuentran el hexano (4,9%) y el pentano (2,13%). La emisión de los COVDM proviene en primer lugar de la combustión de combustibles fósiles y en segundo lugar de la combustión de biomasa. En grandes plantas estas emisiones son controladas, mientras que en unidades pequeñas y antiguas como la mayoría de trapiches artesanales del país, el control es mínimo (Benavides & León, 2007).

Radiación ionizante

Figura 27. Análisis de categorías según sustancias, Radiación ionizante



Fuente: Elaborado por autor

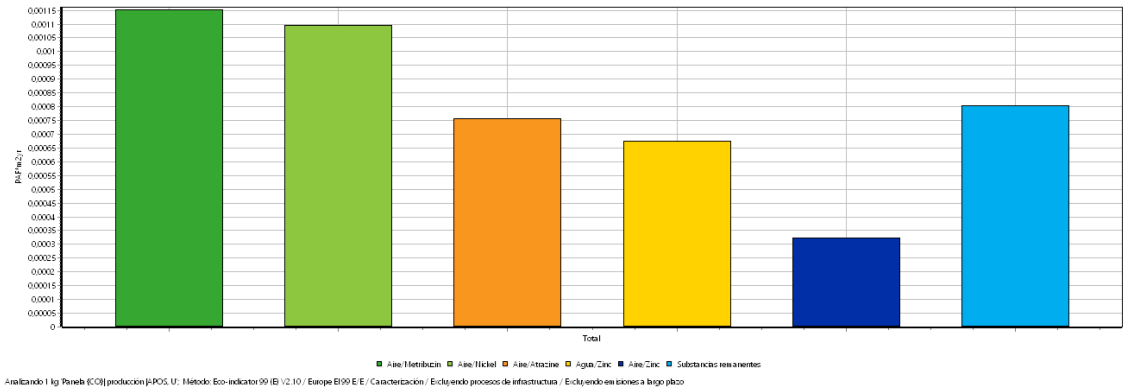
Como se puede observar en la gráfica, el elemento que tiene mayor incidencia en la radiación ionizante es el carbono 14 en el aire (88,3%). De acuerdo con el diagrama de red proporcionado por SimaPro, la presencia de este elemento se debe a los residuos radiactivos de bajo nivel generados durante la producción de petróleo. Es un isótopo de carbono débilmente radioactivo formado a partir de la interacción entre la atmósfera terrestre y

elementos estables. Hace parte del ciclo biológico del carbono distribuyéndose rápidamente entre todos los seres vivos y permaneciendo en la atmósfera en un periodo inferior a 5 años (IAEA, 2002).

- **Calidad de los ecosistemas:** El indicador utilizado en esta categoría es la diversidad de especies, especialmente las platas vasculares y los organismos sencillos.

Ecotoxicidad

Figura 28. Análisis de categorías según sustancias, Ecotoxicidad

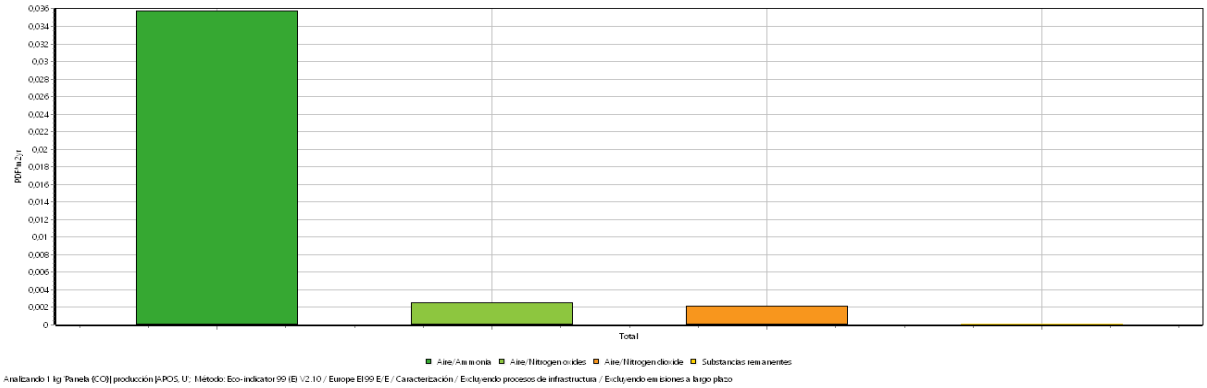


Fuente: Elaborado por autor

Los compuestos químicos en el aire como metribuzin (24%), niquel (22,8 %) y atrazina (15,7%), y el zinc en el agua (14,1%), son los que tienen mayores niveles de ecotoxicidad en el proceso productivo de la panela. El metribuzin y la atrazina son herbicidas ampliamente utilizados para el control de malezas en los cultivos, pero su uso debe ser monitoreado debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente, especialmente en aguas superficiales y subterráneas (Resino, 2014). El niquel al ser liberado a la atmósfera por incineradoras, se deposita en el suelo o en aguas superficiales y es absorbido por los sedimentos hasta inmovilizarse (ATSDR, 2016). El zinc por su parte, es un metal esencial que se encuentra de forma natural, pero que en concentraciones elevadas por actividades antrópicas como la fabricación de fertilizantes puede tener efectos tóxicos en el medio (Resino, 2014).

Acidificación/eutrofización

Figura 29. Análisis de categorías según sustancias, Acidificación/Eutrofización

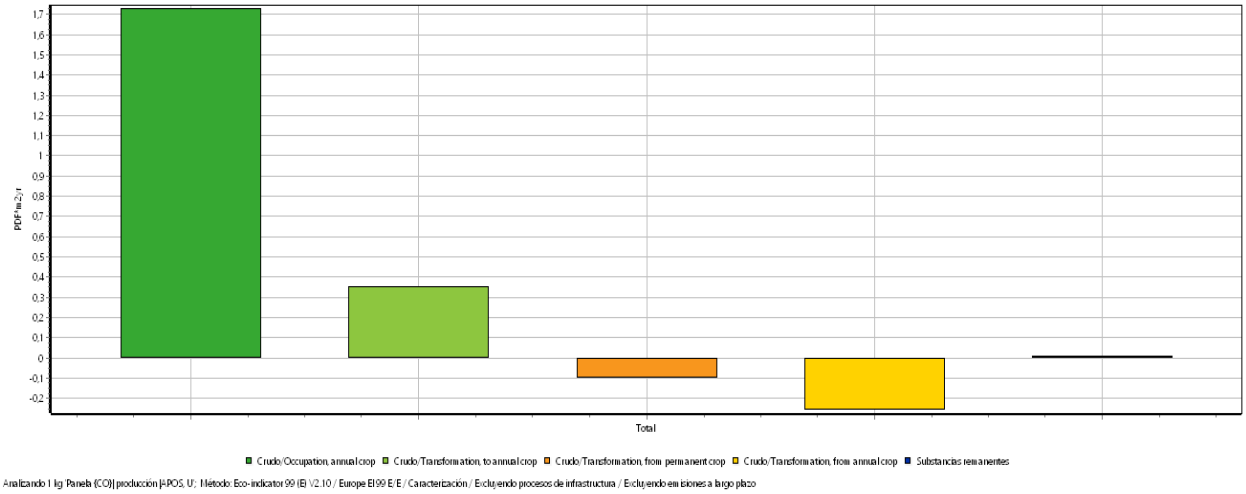


Fuente: Elaborado por autor

Como se puede apreciar en la imagen, el amoniaco en el aire es la sustancia que mayor porcentaje de contribución presenta para la acidificación/eutrofización (88,2%) y en menor proporción se encuentra la emisión de óxidos de nitrógeno (6,24%). Los fertilizantes amoniacales presentan un índice de acidez alto, entre más alto sea este valor mayor será el efecto residual ácido en el suelo (Espinosa & Molina, 1999). Tanto el amoniaco como los óxidos de nitrógeno son dos de los tres gases contaminantes acidificantes más importantes por su capacidad de ocasionar daño a los ecosistemas sensibles de acidificación. Estos gases luego de ser dispersados pueden permanecer y viajar en el aire durante varios días, por lo que también pueden provocar efectos negativos en zonas alejadas de su fuente de emisión. Cabe señalar que el Protocolo de Gotemburgo fue adoptado para luchar contra la acidificación, eutrofización y ozono troposférico mediante el establecimiento de límites máximos de emisión de dichos gases (Ministerio para la transición ecológica de España, 2016).

Uso del suelo

Figura 30. Análisis de categorías según sustancias, Uso del suelo



Fuente: Elaborado por autor

Este resultado coincide con el de (Companioni Rojas, 2009) en cuanto a que los impactos de esta categoría son producidos principalmente por la etapa agrícola. El mayor aporte está dado por la ocupación de cosecha anual (99,8%), seguido de la transformación a cosecha anual (20,4%). El origen del cultivo de caña tiene un impacto en las condiciones del suelo en cuanto a la compactación y la erosión eólica o hídrica. La quema es una práctica utilizada para la eliminación de la cobertura vegetal, el control de malezas y la disminución del material seco, esta actividad disminuye la cantidad de materia orgánica y aumenta la compactación, lo cual modifica las propiedades del suelo. Adicional a ello, la aplicación de agroquímicos en las áreas de producción tiene efectos contaminantes en las fuentes hídricas y el suelo (Cabrera & Zuaznábar, 2010).

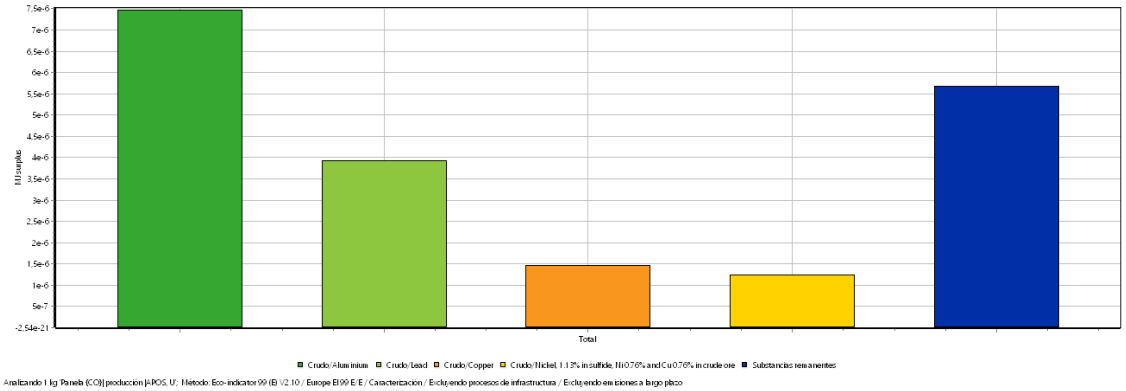
Por otro lado, se presentan impactos favorables como la transformación de la cosecha anual (-15%) y la transformación de la cosecha permanente (-5,69%). Esto se debe a que de acuerdo con ASOCAÑA, las toneladas anuales de biomasa que aporta el cultivo lo protegen de la

erosión. Los suelos a su vez, poseen características adecuadas de retención de humedad y altos niveles de materia orgánica gracias al reciclaje de subproductos provenientes del mismo cultivo (ASOCAÑA, 2013). Los suelos destinados a la producción de caña de azúcar deben asegurar la provisión de servicios ecosistémicos mínimos, procurando la rehabilitación y conservación de la biodiversidad como sea posible (CENGICAÑA, 2017).

- **Los recursos:** En esta categoría se modelan los recursos minerales y combustibles fósiles y se incluye la necesidad extra de energía para extraer mineral de baja calidad y recursos fósiles en el futuro.

Uso de minerales

Figura 31. Análisis de categorías según sustancias, Uso de minerales

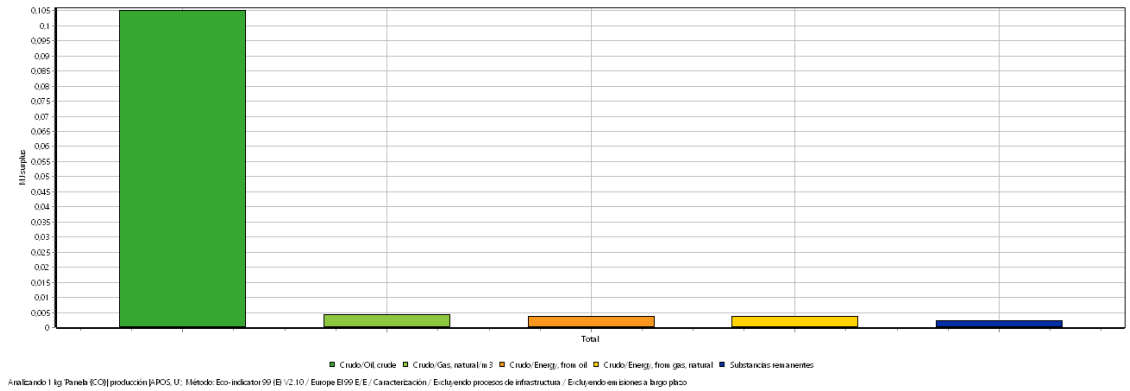


Fuente: Elaborado por autor

Para el agotamiento de minerales se tiene un porcentaje más distribuido según el tipo de sustancia. En primer lugar se encuentra el aluminio (37,7%), seguido del plomo (19,8%), cobre (7,42%), níquel (6,29%) y acero (5,16%). El mayor contribuyente a esta categoría es la caña con un 62,7%, debido al aluminio, plomo y acero requeridos para la fabricación de maquinaria agrícola y fertilizantes para la semilla de caña. En segundo lugar con un 24,9% se encuentra la solución de limpieza, la cual había sido irrelevante en las anteriores categorías de impacto. Dicho resultado se debe al uso de minerales como aluminio, níquel, y cobre necesarios para la fabricación del jabón proveniente de la refinería de aceite de palma.

Agotamiento de combustibles fósiles

Figura 32. Análisis de categorías según sustancias, Agotamiento de combustibles fósiles



Fuente: Elaborado por autor

La mayor contribución al agotamiento de combustibles fósiles se debe al aceite crudo (88,3%), seguido del gas natural (6,79%). Como era de esperar, el aporte de esta categoría se debe en su gran mayoría a la energía a partir de ACPM y al uso de ACPM. Dicho combustible proviene de la producción de petróleo a partir de aceite crudo y gas natural. Este resultado concuerda con los estudios realizados por (Quezada, Moreno et al., 2017) y (Companioni Rojas, 2009), en cuanto a que el uso de combustibles fósiles se presenta fundamentalmente por el consumo de diésel en la etapa industrial.

De acuerdo con los resultados del análisis del inventario de ciclo de vida y de la evaluación de impactos, es posible determinar que el asunto con mayor incidencia para la producción de panela es la caña de azúcar. Este resultado era de esperar debido a que es el insumo con mayor cantidad requerida para fabricar 1kg de panela, además de tener un alto porcentaje de contribución al daño de Calidad del ecosistema y en la mayoría de categorías de impacto: 78,5% en Efectos cancerígenos; 79,9% Cambio climático; 55,7% Ecotoxicidad; 79,3% Acidificación/eutrofización; 89,5% Uso del suelo y 56,2% Uso de minerales. La segunda categoría de agrupación es el daño a la Salud humana representado por la energía aprovechada a partir del bagazo seco quemado en la hornilla al tener un 71,5% en Respiración de partículas inorgánicas. Por otro lado, la energía partir de ACPM quemado en maquinaria tiene los mayores aportes a los Recursos, con una contribución a las categorías de: Respiración de partículas orgánicas 63,4%; Radiación ionizante 40,9%; Disminución de la capa de ozono 40,5% y Agotamiento de combustibles fósiles 41,2 %. En cuanto al elemento solución de limpieza, tuvo su mayor aporte (24,9%) en la categoría de Uso de minerales. Mientras que otros elementos como baba de cadillo y electricidad de voltaje medio, fueron irrelevantes en la evaluación de impactos.

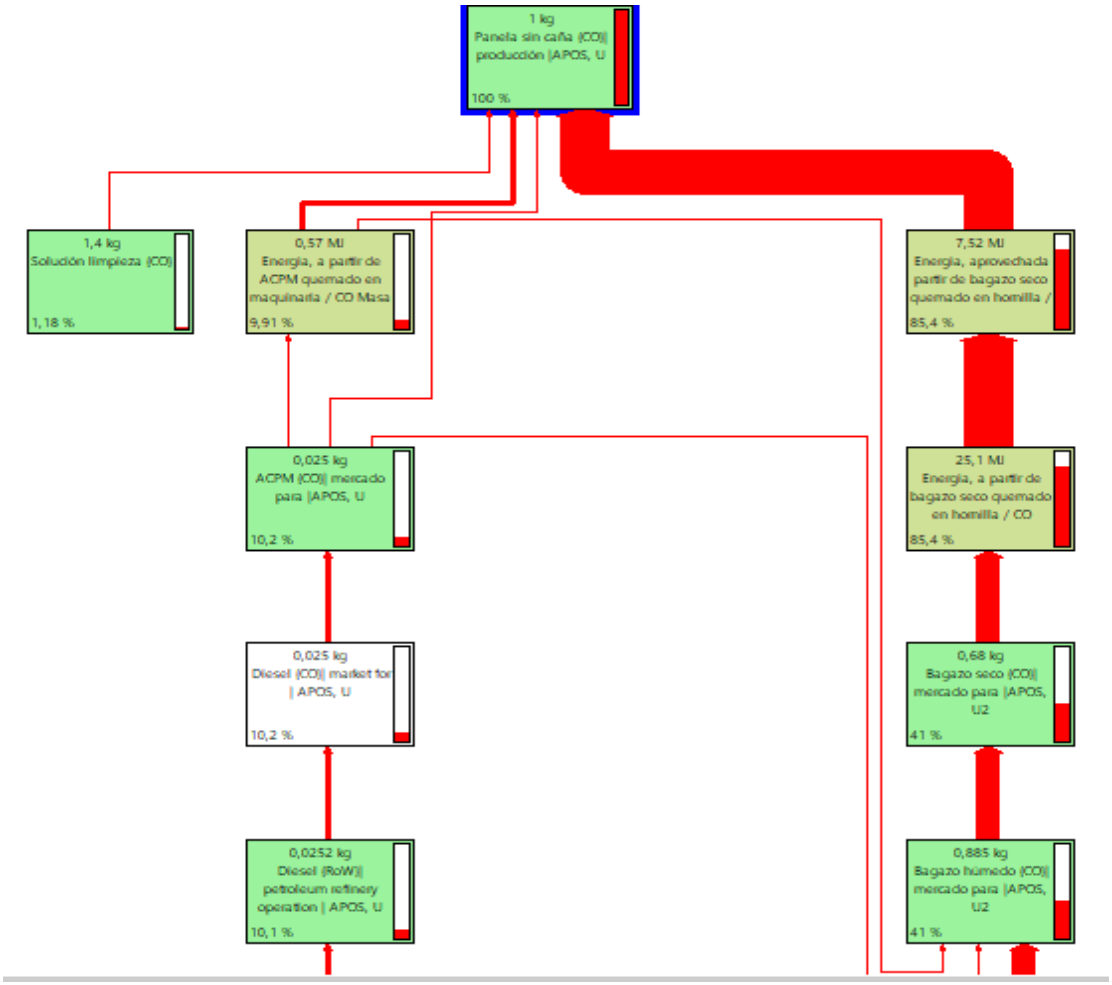
7.1.4.2. Análisis de sensibilidad

De acuerdo con la NTC-ISO 14044:2007, la sensibilidad de los resultados se evalúa estableciendo escenarios supuestos que pueden incluir la necesidad de: 1. Excluir del estudio las etapas del ciclo de vida o procesos, si carecen de importancia; 2. Excluir las entradas y salidas de procesos, si carecen de importancia para el estudio y 3. Incluir nuevos procesos o entradas y salidas, si son potencialmente importantes.

7.1.4.2.1. Simulación del escenario sin caña de azúcar

Según los resultados obtenidos, se determinó que la caña de azúcar es el asunto más significativo del proceso. Sin embargo, al tratarse de un análisis de ciclo de vida enfocado en la etapa productiva de la panela, surge la necesidad de crear un escenario supuesto en el que se excluya la caña de azúcar. Esto con el fin de evaluar con mayor detalle cuáles son las cargas ambientales del sector manufacturero en las que hay posibilidades de intervención para mejorar el desempeño ambiental de la empresa.

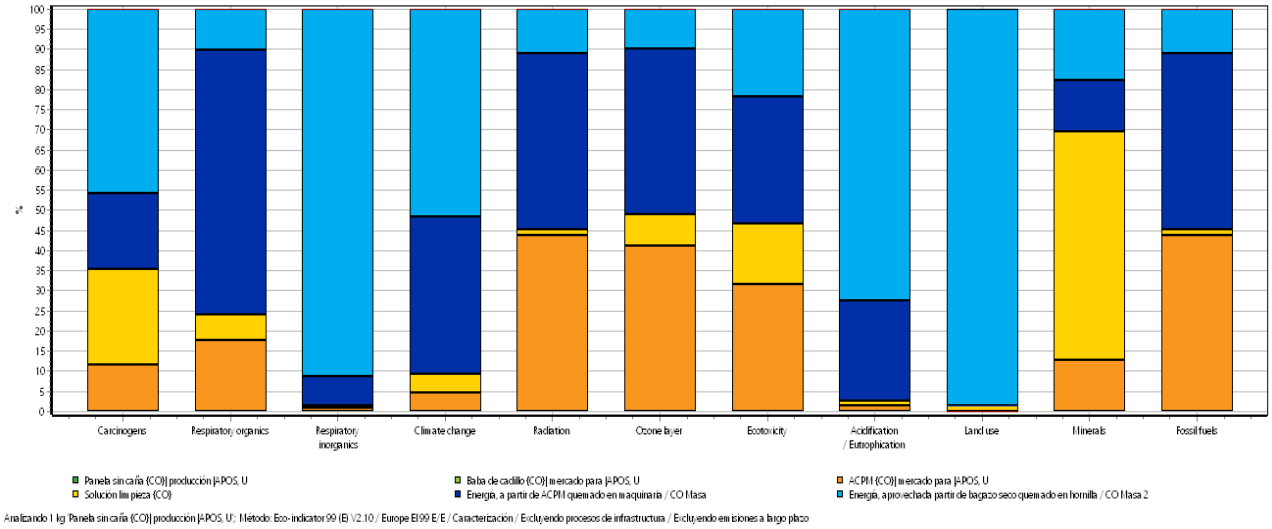
Figura 33. Diagrama de red del proceso productivo de la panela sin caña de azúcar



Fuente: Elaborado por autor

El diagrama de red a un nivel de detalle del 1% revela que la energía aprovechada a partir del bagazo seco constituye el elemento con mayor nivel de generación de impactos ambientales en el proceso de elaboración de panela al excluir la caña de azúcar. También se puede observar que a pesar de que los otros elementos incrementaron su contribución al proceso, la baba de cadillo y la electricidad media aún siguen teniendo un valor insignificante.

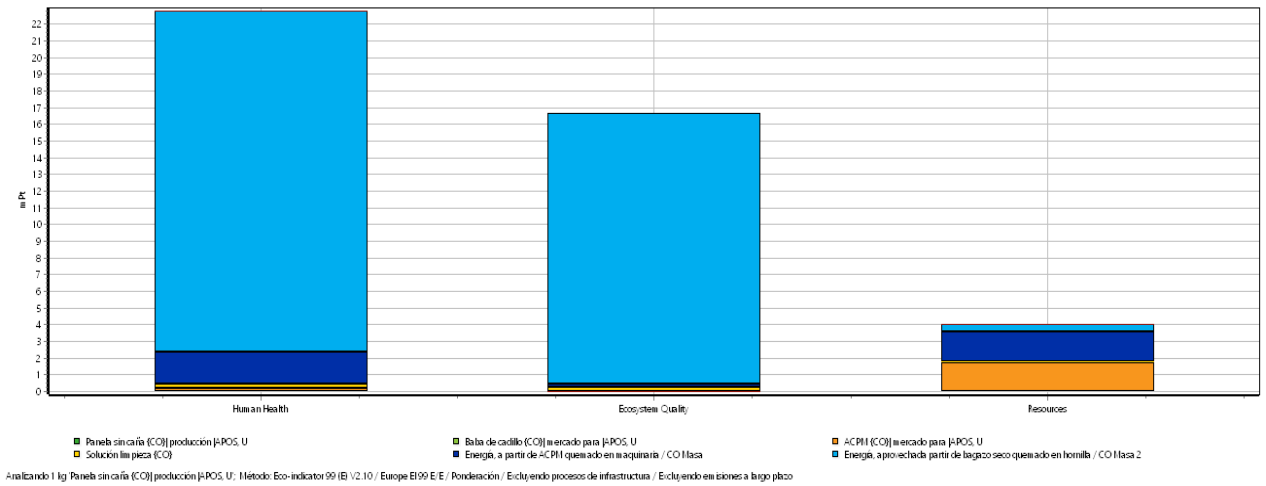
Figura 34. Caracterización del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar



Fuente: Elaborado por autor

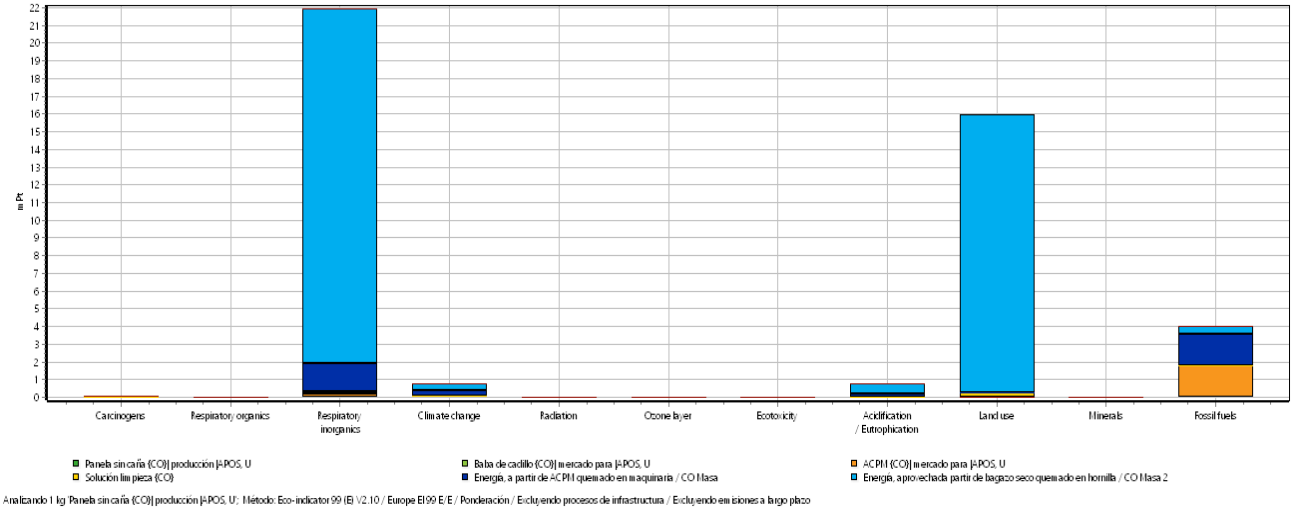
El diagrama de caracterización permite observar que la solución de limpieza ahora tiene mayor relevancia en otras categorías. El Uso de minerales es el elemento más representativo 56,8% y en Efectos cancerígenos y Ecotoxicidad obtuvo valores significativos (23,7% y 15% respectivamente). En cuanto a la energía del motor a partir de ACPM los valores se mantienen en casi todas las categorías, excepto en Respiración de partículas orgánicas donde el valor aumentó a 65,9%. Por otro lado, la energía a partir de bagazo sigue teniendo la mayor contribución en la categoría de Respiración de partículas inorgánicas con 91,2% y en Uso del suelo obtuvo el mayor aporte con 98,5%, debido a que el bagazo sigue siendo un subproducto proveniente de la caña de azúcar.

Figura 35. Ponderación del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar



Fuente: Elaborado por autor

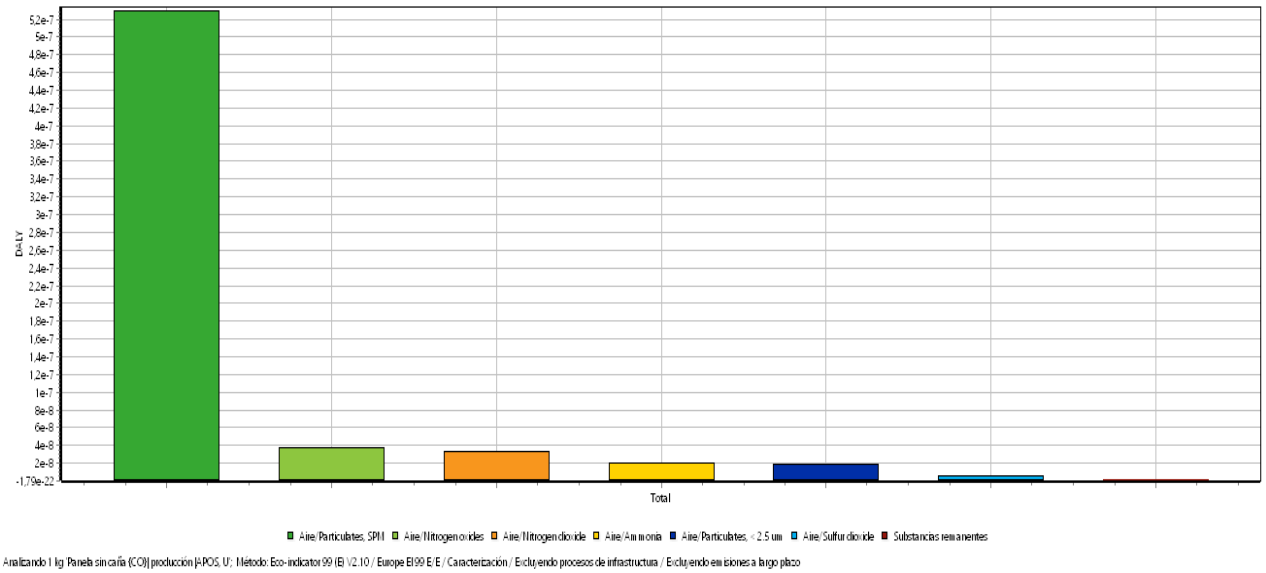
Figura 36. Ponderación del ciclo de vida de la etapa producción de la panela sin caña de azúcar por categoría de impacto



Fuente: Elaborado por autor

La gráfica de ponderación muestra que al eliminar la caña de azúcar del sistema, se tiene que la categoría de agrupación más afectada es Salud humana, seguido por Calidad del ecosistema, donde el mayor contribuyente en ambas es la energía a partir de bagazo seco. Mientras que el tipo de daño Recursos se mantiene relativamente constante. Al realizar la ponderación enfocada en las categorías de impacto, se tiene que la mayor afectación a la Salud humana se debe a la Respiración de partículas inorgánicas.

Figura 37. Análisis de categorías según sustancias, Respiración de partículas inorgánicas



Fuente: Elaborado por autor

Luego de realizar el análisis de caracterización de la categoría Respiración de partículas inorgánicas, se encontró que el material particulado aporta el 82% de daño, del cual es

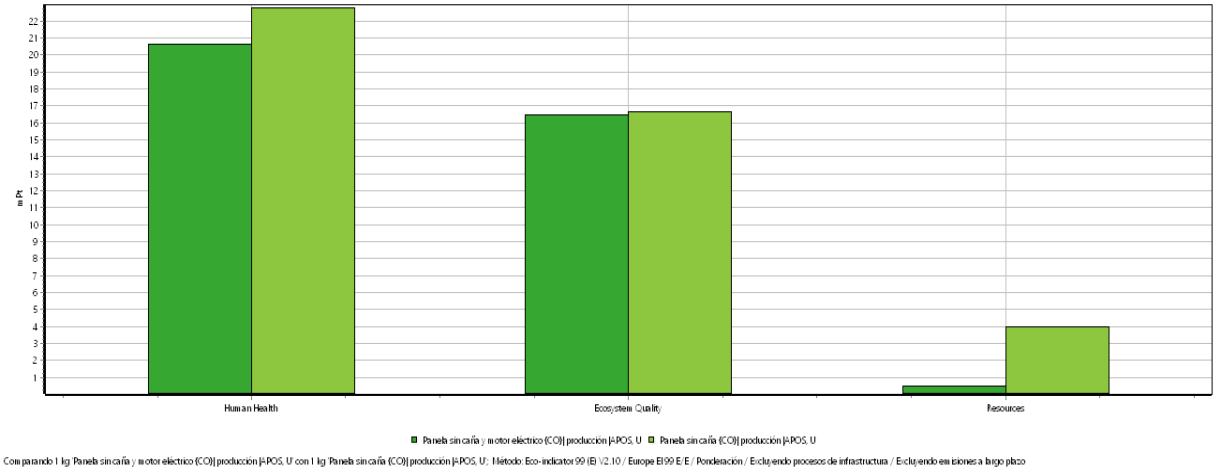
responsable en un 100% la energía aprovechada a partir de bagazo seco. Este análisis de sensibilidad permitió identificar que el asunto más significativo y que requiere mayor atención es la energía a partir de bagazo seco. De acuerdo con las Guías de calidad del aire realizadas por la OMS, existe una amplia gama de efectos en la salud relativos al material particulado, pero los efectos se producen especialmente en los sistemas respiratorio y cardiovascular. Las partículas menores a 10µ suponen mayores problemas dentro de los cuales se ha vinculado la muerte prematura en personas con enfermedades cardiacas o pulmonares, infartos de miocardio no mortales, latidos irregulares, asma agravada, función pulmonar reducida y síntomas respiratorios aumentados. Sin embargo, un factor a tener en cuenta es la susceptibilidad de la persona afectada según la salud o la edad y la frecuencia de exposición (OMS, 2005).

7.1.4.2.1 Simulación del escenario del sistema con motor eléctrico

En este escenario alterno se excluyó nuevamente la caña de azúcar y se tomó la decisión de sustituir el motor accionado por ACPM que actualmente posee la finca Las Camelias por uno eléctrico, esto con el propósito de analizar el cambio de comportamiento de las cargas ambientales en SimaPro.

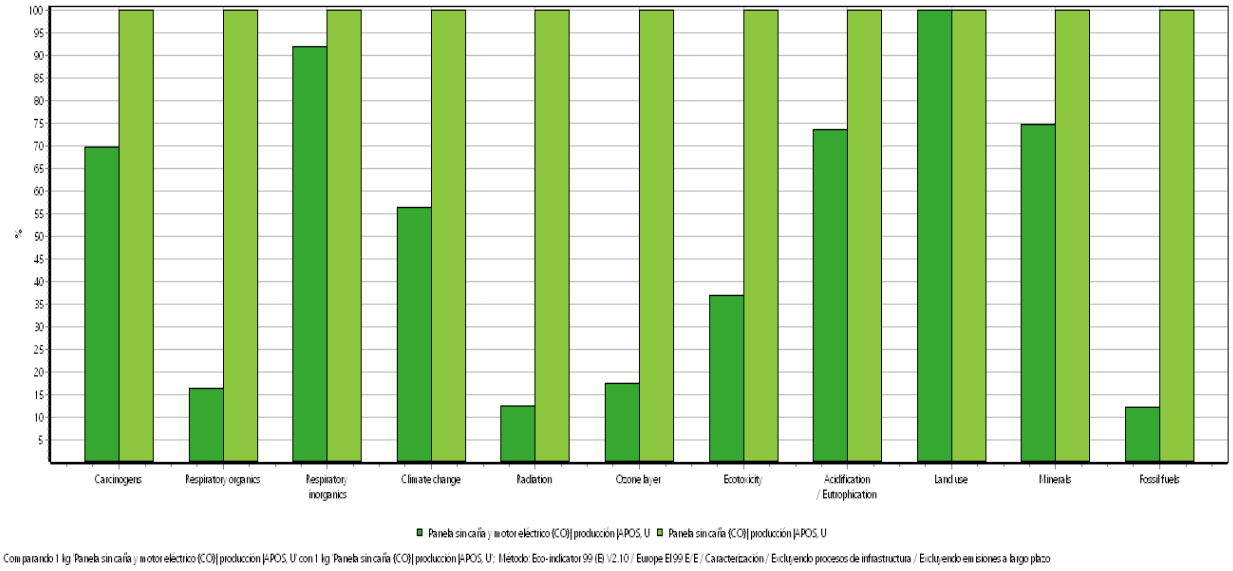
Para realizar los cambios fue necesario comunicarse con empresas que comercializan motores eléctricos para trapiches. La información suministrada fue tomada como referente para realizar los cálculos de la electricidad requerida del equipo (Ver Anexo D).

Figura 38. Comparación entre motor con ACPM y motor eléctrico en ponderación por categorías de agrupación



Fuente: Elaborado por autor

Figura 39. Comparación entre motor con ACPM y motor eléctrico en caracerización



Fuente: Elaborado por autor

La EICV para la simulación de este escenario, muestra que mediante la ponderación por categorías de agrupación hay una redistribución de la carga ambiental. Se evidencia una disminución significativa en los Recursos pasando de 4 mPt a 0,494 mPt. Esto debido a que se suprimieron los elementos de ACPM y energía a partir de ACPM que anteriormente eran los principales contribuyentes de dicha categoría. Salud humana por su parte, también tuvo una disminución notoria, mientras la Calidad del ecosistema se mantuvo prácticamente constante. Al realizar la caracterización por categorías de impacto se tuvo que los mayores beneficios se encontraron en Combustibles fósiles, Radiación Ionizante, Respiración de partículas orgánicas, Capa de ozono con un más de un 80% de reducción. En segundo lugar se encontraron las categorías de Ecotoxicidad 63%, Cambio climático 44%, Carcinógenos 30%, Acidificación/Eutrofización y Minerales 27%, Respiración de sustancias inorgánicas 8%. Mientras que Uso del suelo fue la única categoría que se mantuvo con los mismos valores.

Finalmente se obtuvo una reducción de 5,9 mPt de la carga total del proceso, resultado similar al ACV de la panela en Colombia donde al reemplazar el motor de diésel por uno eléctrico se tiene una disminución de 3,82 puntos (Castañeda-Suárez et al., 2017). Estas cifras demuestran que el uso de motor eléctrico para el funcionamiento del trapiche constituye una buena alternativa para mejorar la eficiencia del proceso productivo de la panela en términos ambientales.

7.2. Resultados del objetivo específico 2:

De acuerdo con los resultados obtenidos en el ACV y partiendo del conocimiento adquirido en campo sobre la dinámica de producción de la panela, se presenta una propuesta de alternativas desde la gestión ambiental, con el propósito de que los puntos a tratar sean tenidos en cuenta para la toma de decisiones en los trapiches paneleros. Las recomendaciones se encuentran enfocadas a la mejora del sistema productivo mediante la implementación de BPM que se creyeron pertinentes, con el fin de mejorar los puntos críticos identificados correspondientes a: la caña de azúcar, la energía a partir de bagazo seco quemado en la hornilla y la energía a partir de ACPM quemado en maquinaria.

Por otro lado, de acuerdo con el análisis de sensibilidad donde se propone un escenario en el que se sustituye el motor accionado por ACPM por un motor eléctrico, se presenta un análisis de viabilidad técnica y financiera. Esto con el fin de corroborar que tan factible sería la implementación de dicha propuesta.

7.2.1. Uso de motor eléctrico

En el EICV se encontró que uno de los principales focos de contaminación es la energía a partir de ACPM quemado en maquinaria. Esto se debe a que en la mayoría de trapiches se utiliza un motor de combustión interna que permite accionar el molino durante la etapa de Extracción de jugos. Sin embargo, este tipo de motores generan alteraciones en el componente aire por la emisión de gases a la atmósfera y en el componente social por la exposición de los operarios a dichos gases y por los altos niveles de ruido que produce el motor (Ministerio del Medio Ambiente de Colombia et al., 2002).
Con el fin de disminuir la contaminación causada por la deficiente combustión, se presentan recomendaciones preventivas para el adecuado mantenimiento del motor presentes en el *Manual de BPM y BPA en la producción de caña y panela de la FAO*: "1) Cada día de uso se debe comprobar la cantidad de combustible, las fugas de aceite, agua y combustible, el nivel y estado del aceite lubricante, el aceite alrededor de los vástagos de las válvulas, verificar la temperatura del agua y el humo de escape; 2) Cada 100 horas limpiar el filtro de aire y comprobar que todas las tuercas estén apretadas 3) Cada 250 horas comprobar la tensión de la correa de accionamiento y el estado de los inyectores de combustible; 4) Cada 500 horas limpiar el filtro de combustible, palpar la manguera del agua, ajustar la luz de las válvulas, cambiar el aceite del motor, limpiar el colador del aceite lubricante; 5) Cada 1.000 horas descarbonar el motor, esmerilar las válvulas, comprobar si hay incrustaciones en el agua, limpiar tanques de combustible y agua y cambiar filtro de combustible" (Osorio, 2007).

De acuerdo con la Resolución 1792 de 1990, el tiempo límite permisible de ruido continuo e intermitente es de 8 horas diarias. Sin embargo, en Las Camelias se excede dicho límite de jornada máxima laboral vigente a 15 horas (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social y de Salud, 1990). Los riesgos físicos causados por los altos decibeles que genera el motor atentan

contra la capacidad auditiva de los operarios. Por estos motivos, se sugiere instalar silenciadores y utilizar elementos de protección adecuados como tapones siliconados y de copa (Vargas Vásquez & Arenas Amaya, 2013).

Estas alternativas pueden funcionar en términos generales si existe un compromiso de todos los actores involucrados. Sin embargo, no se está atacando el problema de raíz, ya que las emisiones van a disminuir pero no serán erradicadas y la generación de ruido seguirá afectando el medio biótico y la comunidad aledaña al trapiche. Por este motivo, surge la necesidad de implementar una alternativa que pueda mitigar el daño. Como antecedente a la medida planteada, se tiene la *Guía constructiva para trapiches con capacidad de 100 kg/h de panela* donde los autores recomiendan el uso de motores eléctricos al ser una opción recomendable para evitar el ruido generado por los motores de combustión interna y obteniendo los mismos beneficios de extracción (Eslava & Reinel, 2013).

7.2.1.1. Desarrollo de la medida

De acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado en el ACV, el escenario alterno presentó mejoras en todas las categorías de impacto a excepción de la categoría de Uso del suelo que se mantuvo constante. A continuación, se presenta una tabla con los valores de ponderación al realizar la comparación entre los dos tipos de motor:

Tabla 5. Valores de ponderación, comparación de motores

Categoría de impacto	Motor combustión interna (mPt)	Motor eléctrico (mPt)
Carcinógenos	0,0755	0,0526
Respiración de sustancias orgánicas	0,00288	0,000474
Respiración de sustancias inorgánicas	21,9	20,2
Cambio climático	0,761	0,429
Radiación ionizante	0,00423	0,000528
Capa de ozono	0,000657	0,000115
Ecotoxicidad	0,0186	0,00687
Acidificación/Eutrofización	0,735	0,541
Uso del suelo	15,9	15,9
Minerales	0,00031	0,000231
Combustibles fósiles	4	0,494
Total	43,5	37,6

Fuente: Elaborado por autor

Estos resultados concuerdan con los de (Castañeda-Suárez et al., 2017), en cuanto a que al realizar el cambio por un motor eléctrico, se obtuvo una reducción de las categorías de impacto más relevantes y de la carga ambiental global, donde la categoría de Combustibles fósiles fue la que tuvo mayor mejora.

Para realizar el escenario de sustitución del motor de combustión interna por un motor eléctrico, fue necesario establecer comunicación con empresas comercializadoras de este tipo de productos. Para ello, se tuvo cuenta que la capacidad de molienda del trapiche Las Camelias es de aproximadamente 1500kg/d de caña, por lo que de acuerdo con la información suministrada por los expertos, el motor de 10 HP es el que más se ajusta a dichas especificaciones.

7.2.1.2. Factibilidad de la medida de ser implementada

Para la posible implementación de la medida fue necesario realizar una proyección de seis años, con el fin de evidenciar el flujo financiero y los indicadores Valor Presento Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR).

1. Escenario actual

En el escenario actual de la finca se deben tener en cuenta los gastos e ingresos para así determinar el Costo Unitario de Producción (CUP) y los valores obtenidos se asumirán a partir de las visitas en campo dado que en la finca no se tiene un historial de contabilidad. Además de los insumos presentes en el ICV, también se tuvieron en cuenta otras variables como el uso de aceite para motor, valvulina, bolsa plástica para el empaque y el personal requerido para la elaboración de panela.

Tabla 6. CUP de panela

Costo unitario de producción						
Insumo	**Costo**	**Unidad**	**Cantidad por UF**	**Unidad**	**CUP**	**Unidad**
Caña	34,17	$/kg	11,5714	kg	395,4073	$
ACPM	2536046,20	$/m3	0,0000	m3	32,6531	$
Valvulina	25,50	$/ml	0,4184	ml	10,6684	$
Aceite de motor	88000	$/gal	0,0000	gal	1,2721	$
Detergente	4450	$/Kg	0,0003	Kg	1,2104	$
Hipoclorito de sodio	3698,41	$/L	0,0005	L	2,0119	$
Iluminación	480,77	$/KWh	0,0049	KWh	2,3352	$
Bolsa plástica	305,56	$/u	1,0000	u	305,5556	$
Cadillo	2645,50	$/kg	0,0068	kg	17,9966	$
Personal	550000	$/personal	0,0007	personal	374,1497	$
CUP Total					1143	$

Fuente: Elaborado por autor

De acuerdo con los valores obtenidos, se estima que el CUP de un kilogramo de panela es $1143. Teniendo en cuenta que en un día completo de trabajo se producen 1470 kg de panela y en un mes sólo hay 2,5 días de producción, se lograron calcular los costos anuales de producción. Adicional a esto, de acuerdo con la Ley 40 de 1990, se asume que el trapiche

debe pagar la Cuota de Fomento Panelero, es decir debe cancelar el 0,5% del precio de cada kilogramo de panela que produzca, por tener una capacidad de molienda inferior a 10 toneladas por hora (Congreso de la República de Colombia, 1990). No se tuvo en cuenta el precio del Registro Sanitario del INVIMA, dado que este registro es requerido únicamente por aquellos establecimientos que adicionen saborizantes adicionales al producto (INVIMA & FEDEPANELA, 2009).

Con el propósito de calcular la evolución de los costos a 6 años, se utilizó el Índice de Precios al Consumidor equivalente a 3,10% del año corrido entre agosto de 2017 y 2018 (DANE, 2018). Para calcular el total de ingresos de la finca entre el periodo 2019-2024, fue necesario estimar un valor promediado a partir del *Boletín semanal de precios mayoristas* realizado por el DANE entre marzo y julio de 2018. El estudio refleja que el comportamiento del precio de la panela cuadrada morena está sujeto a las condiciones climáticas de la región y la dinámica de comercialización. Por estos motivos, fue necesario realizar un estimativo mediante un promedio del total de precios registrados donde se obtuvo una reducción en la tasa del precio de la panela en un 0,767% (DANE, 2018). Cabe señalar que la acentuada fluctuación de los precios, origina incertidumbre en los productores en torno a su rentabilidad productiva.

Tabla 7. Escenario económico actual de la empresa

Escenario económico actual de la empresa						
Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Precio de Kg de panela	2240	2223	2206	2189	2172	2155
Ingresos diarias	3292800	3267544,224	3242482,16	3217612,322	3192933,235	3168443,437
Ingresos anuales	98784000	98026327	97274465	96528370	95787997	95053303
CUP	1143	1179	1215	1253	1292	1332
Costo anual de producción	50417776,13	51980727	53592130	55253486	56966344	58732300
Pago al Fondo de Fomento Panelero	493920	509232	525018	541293	558073	575374
Egresos anuales	50911696,13	52489959	54117147	55794779	57524417	59307674
Ganancias	47872304	45536368	43157317	40733591	38263580	35745629

Fuente: Elaborado por autor

2. Escenario alternativo

En este escenario se plantea la sustitución del motor de combustión interna por el motor eléctrico. Por lo tanto, se tendrán en cuenta las mismas variables descritas anteriormente como el IPC, la tasa del precio de la panela y el pago al Fondo de Fomento Panelero. Sin

embargo, cabe señalar que el precio del CUP va a cambiar debido a que se va a tener un mayor consumo de electricidad y se van a eliminar los insumos que antes se requerían para el funcionamiento del motor a combustión.

Tabla 8. CUP de panela escenario alterno

Costo unitario de producción						
Insumo	**Costo**	**Unidad**	**Cantidad por UF**	**Unidad**	**CUP**	**Unidad**
Caña	34,17	$/kg	11,5714	kg	395,4073	$
Detergente	4450	$/Kg	0,0003	Kg	1,2104	$
Hipoclorito de sodio	3698,41	$/L	0,0005	L	2,0119	$
Iluminación	480,77	$/KWh	0,0049	KWh	2,3352	$
Bolsa plástica	305,56	$/u	1,0000	u	305,5556	$
Cadillo	2645,50	$/kg	0,0068	kg	17,9966	$
Personal	550000	$/personal	0,0007	personal	374,1497	$
Uso de motor eléctrico	480,77	$/KWh	0,1013	KWh	48,7049	$
CUP Total					1147	$

Fuente: Elaborado por autor

Al sustituir un motor de combustión interna por un motor eléctrico, se presenta un incremento de precios del 0,35% pasando de un CUP de $1143 a $1147.

Además, para el cumplimiento de la alternativa planteada, la empresa debe invertir $2’800.000 para la compra del nuevo motor. En este escenario se tendrán en cuenta los costos requeridos para la compra de equipos de protección personal. El uso de EPP, no sólo constituye una medida de bioseguridad para los empleados, sino que también mejora la calidad del producto, da confianza a los consumidores y facilita el acceso a mercados nacionales (INVIMA & FEDEPANELA, 2009). De acuerdo con el Decreto 3075 de 1997, todas las personas que realizan actividades de elaboración de panela deben tener capacitación en prácticas higiénicas de manipulación de alimentos, por lo que esta variable también será tenida en cuenta dentro de la inversión (Presidencia de la República de Colombia, 1997). La implementación de estas medidas permitirá que los propietarios se ajusten a los requisitos sanitarios vigentes respecto a las buenas prácticas de higiene para la producción de panela para consumo humano.

Tabla 9. Costos de inversión

Costos de inversión			
Variable	**Cantidad**	**Costo unitario**	**Costo total**
Motor eléctrico	1	2800000	2800000
Capacitación prácticas higiénicas	1	2000000	2000000
EPP para trapicheros y bagaceros			
Tapabocas	4	330	1320

Guantes		6636	26544
Botas		38400	153600
Delantal		14400	57600
EPP para horneros			
Tapabocas	2	330	660
Guantes		6636	13272
Botas		38400	76800
Delantal		14400	28800
EPP para paileros y empacadores			
Gorro	2	19200	38400
Gafas		4900	9800
Tapabocas		330	660
Botas		38400	76800
Delantal		14400	28800
EPP para supervisor			
Delantal	1	14400	14400
Botas		38400	38400
Tapabocas		330	330
Costo total de inversión			**5366186**

Fuente: Elaborado por autor a partir de (Montenegro, 2015)

Se tiene que la inversión de la empresa para cumplir con la viabilidad técnica propuesta, debe ser de $5’366.186. Para realizar el escenario económico de ser implementada la medida, se tomó como año 0 el 2018, por lo que se asume que en los siguientes años se iniciarán los procesos de manufactura.

Tabla 10. Escenario económico alterno de la empresa

Escenario económico alterno de la empresa						
Año	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Precio de la panela	-	$ 2.223	$ 2.206	$ 2.189	$ 2.172	$ 2.156
Ingresos diarios	-	$ 3.267.810	$ 3.242.746	$ 3.217.874	$ 3.193.193	$ 3.168.701
Ingresos anuales	-	$ 98.034.300	$ 97.282.377	$ 96.536.221	$ 95.795.788	$ 95.061.035
CUP (escenario 2)	-	$ 1.147	$ 1.183	$ 1.220	$ 1.257	$ 1.296

CUP anual (escenario 2)	-	-$ 50.599.084	-$ 52.167.656	-$ 53.784.853	-$ 55.452.183	-$ 57.171.201
Pago al Fondo de Fomento Panelero	-	-$ 493.920	-$ 509.232	$ 525.018	-$ 541.293	$ 558.073
Inversión	- 5.366.186	-	-	-	-	-
Ganancias	-	$46.941.296	$44.605.490	$43.276.386	$39.802.312	$38.447.907
Deuda	-	$41.575.110	$86.180.600	$129.456.985	$169.259.297	$207.707.204

Fuente: Elaborado por autor

Como se puede observar en la tabla, la deuda que se tiene en el año 2018, será recuperada en el año 2019. Sin embargo, para corroborar esta afirmación, se calculó el tiempo de retorno de la inversión y se obtuvo que el periodo de recuperación tomará 1,11 años, por lo que a partir de ese momento sólo se tendrán ganancias.

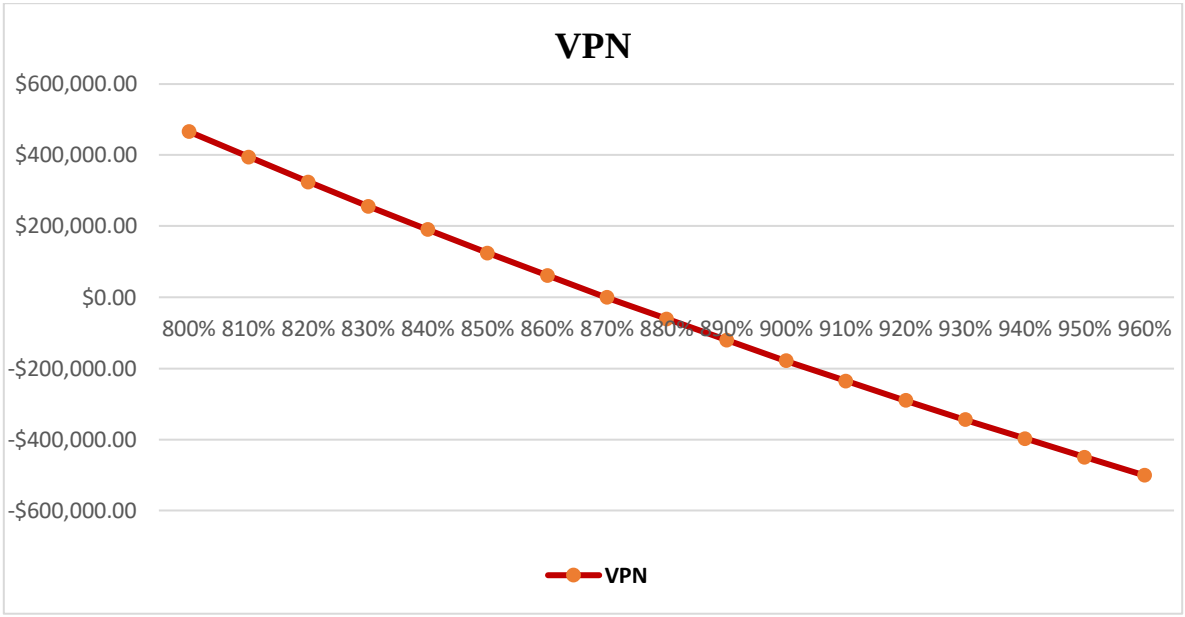
Tabla 11. TIR, VPN y Tiempo de retorno

TIR	870%
VPN	1931355171
Tiempo de retorno	1,11

Fuente: Elaborado por autor

Para definir la viabilidad económica del proyecto también se tuvieron en cuenta el VPN y la TIR. El VPN es una medida de cuánto valor se crea al agregar una inversión. En la gráfica 40 tenemos que el perfil del valor presente neto disminuye a medida que aumenta el costo del capital. La TIR por su parte, se define como la tasa descontada que hace que el VPN sea cero, por lo que muestra el punto que indica la tasa interna de rendimiento. Al realizar el cálculo de la TIR se obtuvo 870%, este porcentaje se refiere al beneficio que tendrá la inversión, al ser un valor positivo indica que se tiene un proyecto rentable. La gráfica también nos muestra que siempre que el costo del proyecto sea menor que 870%, el proyecto será aceptable mientras que si supera este valor el proyecto deberá ser rechazado. Esto se refiere en términos generales que el retorno del proyecto es más que suficiente para compensar el costo de la inversión (Ehrhardt & Brigham, 2007).

Figura 40. Gráfica de VPN vs precio de panela ($)



Fuente: Elaborado por autor

De acuerdo con los resultados se tiene que la propuesta presentada tiene una viabilidad tanto técnica como financiera. Esto se debe a que la rentabilidad de la fabricación de la panela en la finca de estudio es de 51,2%, lo cual permite realizar inversiones que pueden ser recuperadas a corto plazo. Cabe señalar que al definir los costos unitarios de producción no se tuvo en cuenta el consumo de agua dado que en Las Camelias se obtiene de una fuente hídrica directamente por gravedad sin ningún costo de extracción. Por otro lado, tampoco se tuvieron en cuenta los costos de transporte, debido a que la mayoría de sus clientes compran el producto directamente en la finca. Otro factor a tener en cuenta es la alta fluctuación de los precios de la panela por lo que la tasa del precio del producto es difícil de estimar. Esto genera incertidumbre en los productores y a su vez limita la calidad de los resultados. Por lo que se sugiere realizar más estudios que brinden un valor aproximado de la tasa del precio de la panela.

7.2.3. Recomendaciones adicionales orientadas desde la gestión ambiental

Las recomendaciones planteadas se encuentran encaminadas a mejorar la sostenibilidad y la productividad del proceso productivo. Se debe tener en cuenta que dichas recomendaciones se basan en las oportunidades de mejora que se evidenciaron en las visitas de campo y en la búsqueda de una posible intervención para mejorar los puntos críticos encontrados en el ACV.

1. Caña de azúcar

Como se vio en la EICV, la caña de azúcar fue el elemento con mayores aportes a las cargas ambientales del sistema productivo principalmente en el uso de tierra. Teniendo en cuenta

que este estudio se encuentra enfocado a la etapa productiva de la panela, no se van a tratar los temas relacionados a los impactos ambientales generados por la caña en cuanto al uso de fertilizantes para la semilla, el establecimiento del cultivo y la transformación del terreno. Sin embargo, desde el punto de vista productivo se pueden reducir dichos impactos al utilizar una menor cantidad de caña durante la fase de Extracción de jugos.

Actualmente la finca Las Camelias posee un molino con un porcentaje de extracción de 34% (Ver anexo C) del jugo crudo de caña, el cual se encuentra por debajo de la fluctuación normal de los trapiches paneleros entre 40-65% y muy por debajo de una extracción satisfactoria entre 58-63% (Osorio, 2007).

La selección de un molino panelero con mayor capacidad de extracción depende las características del trapiche en cuanto a: La extensión cultivada de caña; El rendimiento agronómico; La frecuencia de molienda; La duración semanal de molienda; Duración diaria de molienda y El periodo vegetativo del cultivo. La cantidad de extracción por su parte, se encuentra en función de la capacidad, potencia, velocidad y calibración del molino y por las características de la variedad y madurez de la caña (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2013).

Figura 41. Molino eficiente

Fuente: (AEA, 2012)

Al realizar una buena extracción se requerirá una menor cantidad de caña, lo cual implica que se puede aprovechar al máximo el jugo crudo y por ende se producirá mayor cantidad de panela mejorando la productividad de la empresa y a su vez se reducirá la cantidad de caña requerida para producir un kilogramo de panela. Por otro lado, al incrementar la cantidad de jugo extraído disminuirá la cantidad de bagazo verde. Este último es un subproducto utilizado como combustible para la hornilla. En Las Camelias hay una sobreoferta de bagazo lo cual afecta el aprovechamiento del calor en la hornilla, debido que se sigue utilizando el bagazo que ha quedado almacenado de anteriores extracciones y lo ideal es utilizar el bagazo lo más fresco y seco posible, ya que pasados 30 días de almacenado se pierde más del 40% de su poder calorífico (AEA, 2016).

2. Energía a partir de bagazo seco quemado en la hornilla

Al realizar la simulación del escenario sin caña de azúcar, se logró identificar que la energía a partir de bagazo seco se encuentra en segundo lugar en términos de generación de cargas ambientales, principalmente porque las emisiones que se generan al quemar la biomasa durante la fase de concentración y evaporación de los jugos, tienen repercusiones en la salud humana de los trabajadores y la comunidad aledaña.

La energía suministrada en la hornilla debería ser suficiente para la elaboración de panela, pero como se puede evidenciar en los cálculos presentes en el Anexo C, gran parte de la energía se desperdicia. Esto se debe en primer lugar, porque el diseño térmico de la hornilla no aprovecha todo el calor suministrado y en segundo lugar porque al haber sobreoferta de bagazo, se sigue utilizando el que ha quedado de anteriores molidas.

Por estos motivos, la solución que parece ser más factible ante dicha problemática consiste en adoptar el proyecto titulado "Mejoramiento de hornillas paneleras mediante recuperación residual y mejora de la dosificación del bagazo" realizado por FEDEPANELA con el auspicio del Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia mediante la Alianza en Energía y Ambiente con la región andina (AEA) y con la interventoría del IICA. El programa tiene un costo de implementación de $33'969100,00 y tiene como fin incrementar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la recuperación de calor residual y la dosificación del bagazo (AEA, 2016).

- ✓ Sistema de recirculación térmica:

Este sistema pretende aumentar la capacidad térmica de la hornilla al reinyectar el calor residual de los gases de escape, lo cual permite el calentamiento y suministro de aire secundario para optimizar la combustión y reducir el consumo de bagazo.

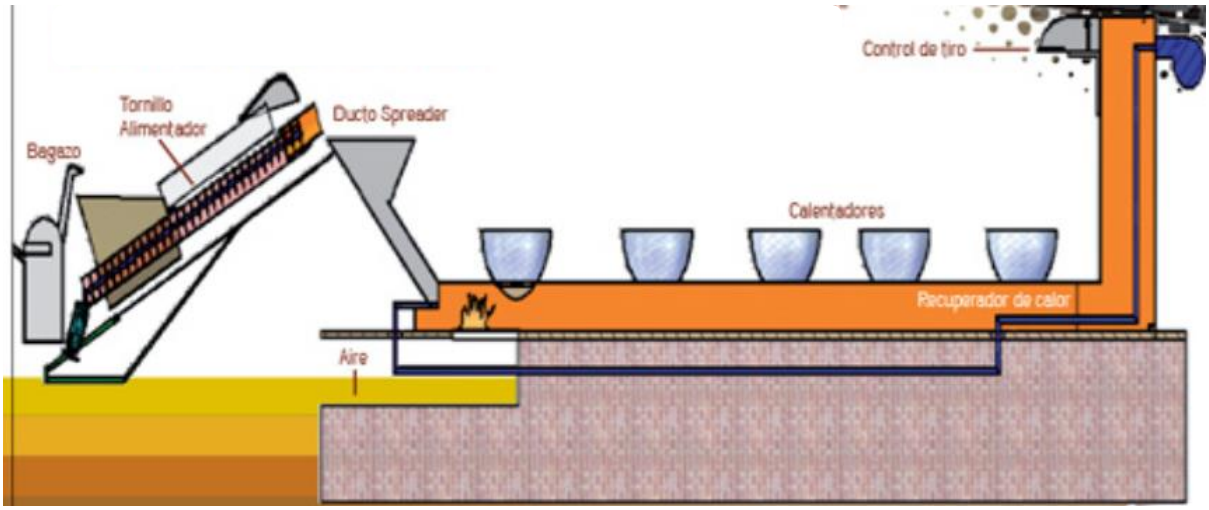
- ✓ Control de tiraje automático y autónomo:

Consiste en un novedoso dispositivo que controla el tiraje de la chimenea mediante la reducción de velocidad de los gases calientes, lo cual permite que permanezcan un mayor tiempo en la hornilla y de esta forma aprovechar mejor la energía al impedir que el calor pase demasiado rápido dentro de la hornilla.

- ✓ Sistema de dosificación del bagazo:

Consiste en secar el bagazo crudo que sale de la extracción del jugo de caña mediante un panel alimentado con el calor de la misma hornilla y conducido a través de un transportador hasta la cámara de combustión, donde la velocidad del suministro de bagazo está calculada para suministrar la cantidad necesaria de combustible. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, se recomienda suministrar el bagazo lo más pequeño posible hasta obtener fibras menores a 15 cm de largo, lo que permite un mejor presecado de la biomasa y evita atascamientos (AEA, 2016).

Figura 42. Esquema general de planta mejorada



Fuente: (AEA, 2016)

A pesar de que es un programa que se encuentra en fase de investigación, se ha comprobado en los trapiches de experimentación que existen beneficios tanto económicos como tecnológicos y ambientales. El sistema de recirculación térmica disminuye los tiempos de producción. El Control de tiraje automático y autónomo no requiere modificaciones y es prácticamente libre de mantenimiento. Se calcula que estos sistemas en conjunto aprovechan en un 50% el calor que antes era desperdiciado y además se estima una reducción anual proyectada de 38 ton de CO_2. El Sistema de dosificación del bagazo por su parte, permite la automatización del proceso de introducción del bagazo seco en la hornilla lo que se traduce en un ahorro de mano de obra, aprovecha todo el poder calorífico del bagazo que usualmente se pierde en un 40% durante el tiempo de secado y disminuye las emisiones anuales de 483 ton de carbono equivalente que pueden ser evitadas al eliminar la acumulación de bagazo. En términos generales se calcula que la implementación de este proyecto podría aumentar en un 30% la productividad y en un promedio de 8% la eficiencia térmica de las hornillas (AEA, 2016).

8. Conclusiones

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida aplicado a la producción de panela en un trapiche tradicional permitió identificar los impactos ambientales potenciales del proceso. Mediante la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida se logró identificar que los puntos críticos en la cadena de valor corresponden a la caña de azúcar, la energía a partir de bagazo seco quemado en la hornilla y la energía a partir de ACPM quemado en el motor.

De acuerdo a lo anterior, se encontró que el mayor grado de afectación se presentó en la Calidad del ecosistema, reflejado principalmente por la categoría de Uso del suelo, el cual se encuentra influenciado por la ocupación y transformación del cultivo. Estos resultados presentan una oportunidad para realizar estudios de ACV enfocados en el establecimiento de

la caña de azúcar, con el fin de obtener una aproximación más detallada sobre las cargas ambientales generadas durante la fase agrícola del proceso.

Al tratarse de un ACV enfocado en la etapa productiva del proceso, fue necesario excluir la entrada de caña de azúcar en el análisis de sensibilidad para evidenciar con mayor detalle las afectaciones generadas por el resto de insumos. Con esta modificación se logró determinar que el mayor daño se presentó en Salud humana principalmente por la Respiración sustancias inorgánicas, esto debido al uso de bagazo seco para calentar la hornilla durante la fase de Evaporación y concentración de los jugos. La combustión dicha biomasa produce emisiones tales como MP, NO_2, NO, entre otros. Cabe señalar que la sustancia más relevante fue el material particulado, el cual es un factor de riesgo para los trabajadores y la población aledaña al trapiche por sus afectaciones a la salud relacionadas con el sistema respiratorio y cardiovascular.

Este estudio permitió verificar que el ACV es una de las mejores herramientas para evaluar la sostenibilidad de los procesos tecnológicos. Mediante la identificación de impactos ambientales, es posible implementar oportunidades de mejora del desempeño ambiental y aportar información a quienes toman decisiones.

La realización de estudios de ACV constituye una actividad rigurosa y compleja que requiere extensa información para su ejecución. Se logró evidenciar la necesidad que existe por ampliar las bases de datos en SimaPro de diferentes productos en Colombia. Además de añadir materiales y procesos sujetos a los distintos tipos de producción que se manejan en los mercados tanto nacionales como internacionales.

La mayor dificultad que se presentó en este proyecto de investigación fue durante la fase del análisis del Inventario de Ciclo de Vida, esto debido a que los tiempos estipulados para la recolección de datos del inventario no coincidieron con las jornadas laborales. En primer lugar, no se tuvo en cuenta que a pesar de que la única actividad económica que se realiza en la finca las Camelias es la fabricación de panela, el proceso productivo se realiza por tradición familiar más no por constituir una fuente de ingresos fija para los propietarios por lo que la molienda solo se realiza 3 días al mes. Por otro lado, tampoco se contó con que inmediato a la aplicación del riego los trapiches paneleros inician la extracción del jugo de caña. Esto debido a que el suministro de agua induce la floración del cultivo y esta a su vez, detiene el desarrollo de los tallos al dejar de producir hojas nuevas (Amaya, Cock, Hernández, & Irvine, 1995). En Las Camelias el único mecanismo de riego del cultivo de caña es la precipitación, por lo que dicha variable meteorológica también limitó el proceso de toma de datos.

A lo largo de este proyecto de investigación se evidenciaron los esfuerzos constantes de entidades como FEDEPANELA, encaminados a la búsqueda de mejoras del proceso productivo de la panela en términos de adquirir mayor competitividad y compromiso

ambiental mediante proyectos de innovación tecnológica y adopción de BPM para garantizar la calidad del producto a lo largo de la cadena productiva. Por estos motivos, los resultados de esta investigación pueden ser tenidos en cuenta como aportes científicos para futuros estudios que contemplen la mejora de los principales focos de contaminación en las unidades de producción.

En cuanto a la factibilidad de la medida propuesta, los resultados fueron satisfactorios, ya que se pudo comprobar la viabilidad del uso del motor eléctrico y de las buenas prácticas de higiene en términos técnicos y financieros. Las ganancias que obtiene la finca indican que en un futuro se podría llevar a cabo la medida planteada, e incluso, las recomendaciones adicionales propuestas parecen tener una alta viabilidad de ser implementas. Por estos motivos, se sugiere que en estudios futuros se realice un análisis financiero de la inversión que supondría obtener un molino con mayor capacidad de extracción y adoptar el programa realizado por la AEA en cuanto a los sistemas de recuperación residual y mejora de la dosificación del bagazo. Esto en aras de mejorar las condiciones tanto ambientales como sociales y económicas que giran en torno al sector manufacturero de la panela, incrementando de igual forma la calidad de vida de los actores involucrados.

9. Recomendaciones

Con el fin de disminuir el margen de error asociado a la elaboración del análisis de ciclo de vida de la panela, se recomienda tomar la totalidad de datos en campo necesarios para el correcto cálculo de entradas y salidas del proceso. Esto implica seguir el "Protocolo para la medición de la temperatura, emisión de gases y determinación de eficiencia energética en hornillas tradicionales de Gualivá" presente en el proyecto de grado de Escobar (2016), el cual indica cómo se debe medir la temperatura con un termopar tipo K y el material particulado, monóxido de carbono y oxígeno con el analizador de gases de combustión en la hornilla panelera. Este último equipo también se podría utilizar para la medición de los gases de combustión generados por la quema del ACPM en el molino de extracción de jugo de caña.

Para el correcto cálculo de las cargas ambientales también se recomienda identificar otras variables asociadas a la etapa de producción de la panela que no fueron tomadas en cuenta debido al alcance del estudio. Dentro de estas variables se encuentra el consumo de gasolina requerida para transportar los insumos desde el punto de venta hasta la finca, el uso de aceite de motor para el adecuado mantenimiento del motor y valvulina para los engranajes del molino.

Otra recomendación basada en disminuir el margen de error consiste en llevar un inventario de insumos del proceso. Este método es de gran importancia debido a que los trapiches tradicionales usualmente no tienen un registro de información, por lo que no se tiene la

certeza de la cantidad exacta de caña para extraer el jugo, ni cuanto bagazo seco ingresar a la hornilla, ni tampoco el número de panelas que van a producir. Esto permitiría obtener una mayor precisión en los resultados del ACV del producto y así mismo ayudaría a los productores a tener una mejor distribución de sus recursos.

La fase de análisis del Inventario de Ciclo de Vida en cualquier ACV constituye la etapa que toma más tiempo y recursos respecto a las otras fases. Por lo que se recomienda tener un tiempo claramente estipulado únicamente para la recopilación y cálculo de datos del inventario. Para el caso particular del ACV de la panela es necesario tener en cuenta la frecuencia de producción y las variables meteorológicas, ya que se pueden presentar dificultades donde los tiempos producción no coinciden con los tiempos de toma de datos.

A pesar de que el trapiche estudiado consume grandes cantidades de agua para la limpieza de los equipos y utensilios, la EICV mostró que los impactos relacionados a dicho insumo no fueron representativos. Esto se debe a que el software utilizado se encuentra orientado a la cuantificación de la huella de carbono, por lo cual se recomienda realizar una evaluación simultánea con una herramienta que tenga en cuenta la huella hídrica. De igual forma, es recomendable realizar un análisis fisicoquímico de los vertimientos para identificar la calidad del agua que es descargada a las fuentes hídricas, esto con el fin de que los datos sean ingresados y posteriormente evaluados en el ACV.

Es recomendable implementar una alianza con los agricultores de caña de azúcar del sector para aprovechar el montaje industrial de “Las Camelias” con el fin de realizar un mayor número de moliendas al mes y verlo como una oportunidad de negocio en la que se generen mayores ingresos para las partes interesadas.

Referencias Bibliográficas

AChEE. (2016). Capacidades Calorificas De Distintos Combustibles Y Factores De Conversion de Unidades. Retrieved August 15, 2018, from http://www.drtoro.cl/ACHEE/documentos/recursos/DireccionAnexo2.pdf

AEA. (2012). Energía Renovable Eficiencia Energética. Proyectos en ejecución de la primera convocatoria del Fondo Concursable AEA 2012. *Programa Alianza En Energía y Ambiente Con La Región Andina*. Retrieved from http://www.energiayambienteandina.net/Publicaciones/Publicaciones.aspx

AEA. (2016). Mejoramiento de hornillas paneleras mediante recuperación residual y mejora de la dosificación del bagazo. Retrieved September 30, 2018, from http://energiayambienteandina.net/fichaColomb_1.html

Alcaldía Municipal de Rovira. (2018). Plano veredal municipio Rovira. Retrieved September 30, 2018, from http://www.rovira-tolima.gov.co/mapas/mapa-rural-de-rovira

Amaya, A., Cock, J. H., Hernández, a D. P., & Irvine, J. E. (1995). *El cultivo de caña en la zona azucarera de Colombia, Cali*. *Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia-CENICAÑA*. Retrieved from

http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p31-62.pdf

ASOCAÑA. (2013). Aspectos generales del Sector Azucarero 2012-2013. *El Dulce Sabor Del Azúcar de Colombia Es Progreso*, 172. Retrieved from http://www.asocana.org/documentos/1552013-F14FE82C-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,B9B9B9,D2D2D2.pdf

ATSDR. (2016a). Resúmenes de Salud Pública - Amoníaco (Ammonia). Retrieved September 30, 2018, from https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs126.html

ATSDR. (2016b). Resúmenes de Salud Pública - Níquel (Nickel). Retrieved September 30, 2018, from https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html

ATSDR. (2016c). Tetracloruro de carbono (Carbon Tetrachloride). Retrieved September 30, 2018, from https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts30.html

Barrios, E., & Loreto, D. (2003). Alternativas y herramientas para la producción más limpia. *ANALES de La Universidad Metropolitana*, *3*(1), 255–270. Retrieved from file:///C:/Users/estef/Downloads/Dialnet-AlternativasYHerramientasParaLaProduccionMasLimpia-4003891.pdf

Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102. https://doi.org/IDEAM–METEO/008-2007

Biblioteca Salud Capital. (n.d.). Ficha técnica del ACPM. Retrieved August 17, 2018, from http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/A.C.P.M..pdf

Bonilla, L. R. (2001). *Municipio de Rovira. Esquema de ordenamiento territorial. Caracterización biofísica, socioeconómica y ambiental*. Rovira. Retrieved from http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/documentos pdf/diagnostico - rovira (451 pag - 1847 kb).pdf

Bourg, D., & Erkman, S. (2003). *Perspectives on Industrial Ecology*. (Greenleaf Publishing Limited, Ed.). Midsomer Norton, UK. Retrieved from eBook Academic Collection (EBSCOhost)

Cabrera, J., & Zuaznábar, R. (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. *Cultivos Tropicales*, *31*(1), 5–13. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193214880001

Castañeda-Suárez, J. E., González-Dumar, A. M., Usma-Rojas, C. A., & Cano-Londoño, N. A. (2017). Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*, *6*(1), 107–122. https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.63316

CENGICAÑA. (2017). Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar, 1–85. Retrieved from https://cengicana.org/files/20170425171748989.pdf

CENICAÑA. (2018). Fechas históricas de la agroindustria de la caña en Colombia. Retrieved September 30, 2018, from http://www.cenicana.org/quienes_somos/agroindustria/historia.php

Cervantes, G. (2011). Ecología Industrial: innovación y desarrollo sostenible en sistemas industriales. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, (1), 59–78. Retrieved from https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/11914/58-78 Cervantes_Ecologia ind.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Comisión de Salud Ocupacional. (2002). PROPIEDADES DE LOS FLUOROCARBUROS. In *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO* (pp. 190–214). Retrieved from https://www.cso.go.cr/tematicas/seguridad/encicplopedia/104-06.pdf

Companioni Rojas, D. (2009). *Título: Análisis del Ciclo de Vida de la producción de Azúcar Crudo en la Empresa Azucarera "Ecuador."* Central "Marta Abreu" de las Villas. Retrieved from http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1301/Q09025.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Congreso de la República de Colombia. (1979). Ley 9 De 1979. *Vasa*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Congreso de la República de Colombia. (1990). Ley 40 de 1990. Retrieved from http://www.fedepanela.org.co/files/LEY_40_DE_1990.pdf

Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 De 1993. *Diario Oficial*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 115 de 1994. Retrieved from https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-85906_archivo_pdf.pdf

Corpoica. (2016). Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano: Cadena Agroindustrial de la panela. *Siembra*, 33. Retrieved from http://www.siembra.co/siembra/Agenda.aspx

Curran, M. A. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook A Guide for Environmentally Sustainable Products*. (WILEY, Ed.). New Jersey: Scrivener Publishing LLC. Retrieved from file:///C:/Users/estef/OneDrive/Documentos/Proyecto de grado/Life Cycle Assessment Handbook A Guide for Environmentally Sust_nodrm.pdf

DANE. (2011). Estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005-2020 total municipal por área. Retrieved August 20, 2018, from https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

DANE. (2018a). *Boletín semanal de precios mayoristas* (Vol. 320). Bogotá D.C. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Sem_28jul__03ago_2018.pdf

DANE. (2018b). IPC total mensual, año corrido y doce meses. Retrieved September 30, 2018, from http://www.dane.gov.co/index.php/52-espanol/noticias/noticias/4794-indice-de-precios-al-consumidor-ipc-agosto-2018

Ehrhardt, M., & Brigham, E. (2007). *Finanzas Corporativas*. (Cengage Learning, Ed.). Retrieved from https://books.google.es/books?id=bLOKcYHC0dsC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=vpn&f=false

Escobar, J. D. (2016). Protocolo para la medición de la temperatura, emisión de gases y determinación de eficiencia energética en hornillas tradicionales de Gualivá. *Facultad de Bioingeniería*, 1–10.

Eslava, J., & Reinel, H. (2013). *Guía constructiva para trapiches con capacidad de 100 kg/h de panela*. *Construcciones rurales*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/306375796_Guia_Constructiva_para_trapiches_con_100_kgh_de_capacidad

Espinal, C. F., Martínez, H., Ortíz, L., & Acevedo, X. (2005). La cadena agroindustrial de la panela en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio Agrocadenas Colombia, (57), 1–22. Retrieved from file:///C:/Users/estef/OneDrive/Documentos/Proyecto de grado/Min 2005.pdf

Espinosa, J., & Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. *Ipni. International Plant Natural Institute*, *1*, 46. Retrieved from http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez y encalado de suelos, libro por J Espinosa y E Molina.pdf

FEDEPANELA. (2018). *Participación de Colombia en el Mercado Mundial de la Panela*.

Frank, M., & Miles, S. (2016). *Systems Thinking: Foundation, Uses and Challenges*. (Nova Science Publishers Incorporated, Ed.). Oxford University Press. Retrieved from eBook Academic Collection (EBSCOhost)

Friedman, A. L., & Miles, S. (2006). *Stakeholders: Theory and Practice*. (Oxford University Press, Ed.). Retrieved from ProQuest Ebook Central - Business Ebooks

García, M. C. (2004). Hornillas Paneleras: Evaluación de su Impacto Ambiental. *Revista de Innovación y Cambio Tecnológico (Colombia)*, *4*(1), 20–29. Retrieved from http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/hornillas-paneleras-evaluacion-de-su-impacto-ambiental.pdf

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). Introduction to LCA with SimaPro. Netherlands: Pre-sustainability. Retrieved from https://simapro.com/

Guerrero, C., & Luengas, E. (2013). *Plan De Manejo Ambiental Para El Sector Panelero En La Vereda Melgas, Municipio De Chaguaní, Cundinamarca*. Universidad Militar Nueva Granada. Retrieved from http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2_4.pdf

Gutiérrez, L., Arias, S., & Ceballos, A. (2016). Evaluación teórica del impacto ambiental de una hornilla tradicional para producción de panela. *Agronomía Colombiana*, *34*(1), 477–480. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1supl.58283

Hernández, A., Reinosa, M., & Hernández, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad & Ciencia*, *6*(2), 17–26. Retrieved from http://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/408/1079

Hernández, M. P., & Duque, J. D. (2014). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA PRODUCCIÓN DE BOCADILLO COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL: ESTUDIO DE CASO PARA TRES PYMES DE LA ASOCIACIÓN GUAJAVA, EN EL NÚCLEO DE DESARROLLO PROVINCIAL DE VÉLEZ, SANTANDER*. El Bosque.

Hernández Sampieri Roberto. (2014). *Metodología de la investigación*. (Mc Graw Hill, Ed.), *Metodología de la investigación* (6th ed.). México D.F. https://doi.org/- ISBN 978-92-75-32913-9

Herrera, I., De La Rúa, C., & Lechón, Y. (2015). Análisis de Ciclo de Vida del proceso de transformación de la caña de azúcar para la producción de bioetanol en la planta de Bella Unión de la empresa Alcoholes de Uruguay (ALUR). Retrieved from http://www.miem.gub.uy/sites/default/files/01_-_acv_etanol_cana_alur_version_final.pdf

IAEA. (2002). DATACIÓN CON CARBONO-14 DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACÜÍFERO RAIGÓN , URUGUAY. Retrieved September 30, 2018, from https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/076/41076194.pdf

ICONTEC. (2006). NTC-ISO 14040:2006 GESTIÓN AMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA. Retrieved from http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000127-a0991a28c5/NTC-

ISO14040-2007 Analisis_CicloVida.pdf
ICONTEC. (2007). NTC-ISO 14044:2007 Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. *Normas ISO*. Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38498
ICONTEC. (2015). NTC-ISO 14001:2015. *2015-09-23*. Retrieved from https://informacion.unad.edu.co/images/control_interno/NTC_ISO_14001_2015.pdf
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. (2007). NTP 119: Cancerígenos químicos. Retrieved from http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_119.pdf
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. (2012). Listado de compuestos Cancerígenos y Mutágenos categorias 1A y 1B. Retrieved from http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP _VALORES LIMITE/Valores limite/Listado de compu.Can. y Mut.1A1B.pdf
INVIMA, & FEDEPANELA. (2009). Abc de la Panela. *Fondo Del Fomento Panelero*, 24. Retrieved from http://www.fedepanela.org.co/publicaciones/cartillas/abc_panela.pdf
Jackson, M. (2003). *Systems Thinking: Creative Holism for Managers*. (British Library, Ed.), *International Journal of General Systems* (Vol. 35). Kingston-upon-Hull. https://doi.org/10.1002/sres
Jensen, A. A., Hoffman, L., Møller, B. T., & Schmidt, A. (1997). *Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources*. *Plant Factory*. European Environment Agency. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00024-X
Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. (Weinheim, Ed.). Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. Retrieved from https://media.wiley.com/product_data/excerpt/62/35273298/3527329862-317.pdf
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2006). El sector panelero colombiano. *Sector Panelero Colombiano*, 1–16. Retrieved from http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/el-sector-panelero-colombiano.pdf
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2013a). *Identificacion de tipologias de trapiches paneleros* (No. 1). Retrieved from http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11438/7992/1/OA-PN-ESP-01_Identificación de tipologías de trapiches paneleros_Ajust_2014.pdf
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2013b). *Propuesta tecnica productividad panela en trapiches*. Retrieved from http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11438/7995/1/OA-PN-PTA-01_Propuesta tecnica RENDIMIENTOS.pdf
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2016). *Cadena agroindustrial de la panela: Indicadores e instrumentos*. Bogotá D.C.
Ministerio de Proteccion Social de Colombia. (2006). Resolución 779 de 2006. Retrieved from https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minproteccion_0779_2006.htm
Ministerio de Trabajo y Seguridad Social y de Salud. (1990). Resolución 1792 de 1990. Retrieved from https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minsalud_r1792_90.htm
Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, SAC, & FEDEPANELA. (2002). *Guía*

ambiental para el subsector panelero. Retrieved from http://www.fedepanela.org.co/publicaciones/cartillas/guia_ambiental_panelera.pdf

Ministerio para la transición ecológica de España. (2016). Gases acidificantes. Retrieved September 30, 2018, from https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_acidificantes.aspx

Montenegro, Y. (2015). *Manual de Buenas Prácticas de Manufactura en la producción de panela de caña, en la vereda Yumbito, municipio El Tambo Cauca*. *Journal of applied microbiology*. Universidad de San Buenaventura. Retrieved from https://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/3302/1/Manual_buenas_practicas_montenegro_2015.pdf

O'Riordan, L. (2017). *Managing Sustainable Stakeholder Relationships*. (S. O. I. · R. Schmidpeter, Ed.). London, UK: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50240-3

Observatorio del territorio. (2016). Plan de Energización Rural Sostenible para el Tolima, 1–51. Retrieved from perstolima.ut.edu.co

OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufe. *Actualización Mundial 2005*. Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=9E7EEB98016EEC14EED84E263C456607?sequence=1

OMS. (2018). Calidad del aire y salud. Retrieved September 30, 2018, from http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Ordoñez, M., & Rueda, L. (2017). Evaluación de los impactos socioambientales asociados a la producción de panela en Santander (Colombia). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *18*(2), 379–396. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:637

Ortega, R. (2007). Guía 9: Cálculo de potencias y factor de potencia". Retrieved September 30, 2018, from http://www.electrotelex.hol.es/guia 9 - calculo potencias y FP.pdf

Osorio, G. (2007). *Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela*. (CTP Print Ltda, Ed.) (1st ed.). Medellín: FAO. Retrieved from http://www.fao.org.co/manualpanela.pdf

PRé Consultants. (2000). *Eco-indicator 99 Manual for Designers*. *Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment*. Retrieved from http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/EI99_Manual.pdf

PRé Consultants. (2018). SimaPro Database Professional. SimaPro.

Presidencia de la República de Colombia. (1974). Decreto 2811, 1974 .Codigo Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Presidencia de la República de Colombia. (1982). Decreto 2 de 1982. Retrieved from https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto_0002_1982.htm

Presidencia de la República de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 1984. *Diario Oficial*. Retrieved from http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617

Presidencia de la República de Colombia. (1991). CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA 1991. Retrieved from http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion politica de Colombia.pdf

Presidencia de la República de Colombia. (1995). Decreto 948 de 1995. *Diario Oficial No. 41.876*.

https://doi.org/https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.alcaldiabogota.gov.co%2Fsisjur%2Fnormas%2FNorma1.jsp%3Fi%3D1479&ei=sDQaU6jFBaTR0wGuzICgBg&usg=AFQjCNHWOepGypon6e0wpeG1WiRCihO3ew&bvm

Presidencia de la República de Colombia. (1997a). Decreto 3075 de 1997. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Presidencia de la República de Colombia. (1997b). Decreto 901 de 1997. Retrieved from https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/decreto-901-de-1997-por-medio-del-cual-se-reglamentan-las-tasas-retributivas-por-la-utilizacic3b3n-directa.pdf

Quezada, Moreno, W. F., Contreras, Moya, A. M., Domínguez, E. R., Domínguez, R., Quezada, Torres, D., Molina, Borja, A., & Rojas, Molina, J. O. (2017). Environmental Impact Evaluation of the Industry of Panela by Life Cycle Analysis. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, *2*(1), 545–552. https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.68

Ramírez, A. (2008). *Metodología de la investigación científica*. *Pontificia Universidad Javeriana*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.027

Resino, I. (2014). *Nuevos horizontes en Ecotoxicología : biomarcadores destructivos y no destructivos en codorniz (Coturnix coturnix) y cigüeña blanca (Ciconia ciconia)*. Universidad de Extremadura. Retrieved from http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/2284/TDUEX_2014_Casa_Resino.pdf?sequence=1

Secretaría de Planeación de Rovira. (2011). *Estadísticas 2011-2014 Rovira*. Rovira. Retrieved from https://www.tolima.gov.co/descargar.php?idFile=2490

Shah, J. (2015). Guidance Notes on Tools for Pollution Management. Cleaner Production. *Getting to Green - A Sourcebook of Pollution Management Policy Tools for Growth and Competitiveness*, 1–11. Retrieved from http://www.worldbank.org

SIGAC. (2018). División político-administrativa de Tolima. Retrieved September 30, 2018, from http://www.colombiamania.com/AA_IMAGENES/mapas/dptos/tolima/02_Tolima-politico-admin-zoom.jpg

Suppen, N., & van Hoof, B. (2005). Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño. *Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable*, 1–39. Retrieved from crpl.chi.itesm.mx/materiales/articulo_acv_y_ecodiseno.doc%0AEn caché%0ASimilares%0A

UNEP. (2004). ¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida? *Life Cycle Initiative*, *1*, 28. Retrieved from http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:¿Por+qué+adoptar+un+enfoque+de+ciclo+de+vida?#0

Universidad El Bosque. (2018). Plan de estudios Ingeniería ambiental. Retrieved August 8, 2018, from http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/2017-07/plan estudios ingenieria ambiental_0.pdf

Vargas Vásquez, M. L., & Arenas Amaya, L. R. (2013). Diagnóstico de las condiciones de trabajo, en los trapiches del municipio de Chitaraque (Boyacá). *El Hombre y La Máquina*, (41), 45–55. Retrieved from http://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=47828416007

Wong, C. W. Y., Lai, K., Lun, Y. H. V., & Cheng, T. C. E. (2015). *Environmental Management: The Supply Chain Perspective*. (Springer, Ed.). Ne York: SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23681-0_1

Zambrano, C. E. (2005). Diseño de programas para el mejoramiento del proceso productivo y las condiciones ambientales mediante estrategias de producción más limpia en el trapiche panelero la Reina Pereira-Risaralda. *Repository La Salle*, 196. Retrieved from http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14761/00798180.pdf?sequence=1

Anexos

Anexo A: Formato de recolección de información

Ubicación Nombre de la compañía Nombre del propietario o del entrevistado	Teléfono Correo electrónico

TIEMPO DE TOMA DE DATOS Inicio Final	Mes Año	COBERTURA DE LA COMPAÑÍA COBERTURA DE LA INDUSTRIA	UNIDAD DE REPORTE DE LA INFORMACIÓN (UF)

TECNOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN (DESCRIPCIÓN)

ENTRADA DE MATERIALES AL PROCESO de producción de leche
(lista de todos las materias primas de entrada al proceso, normalizado según la salida del producto)

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Distancia recorrida hasta llegar al lugar	Características del material

Descripción del procedimiento de muestreo:

SALIDAS ÚTILES			
	Nombre	Cantidad	Unidades
Producto principal			
Co-productos			
Chatarra o residuos recuperados o reciclados (incluye de empaques			

Descripción del procedimiento de muestreo:

USO DE AGUA			
	Fuente (rio, laguna, quebrada)	Cantidad	Unidades
Consumo de agua en el proceso			
Salida			

USO DE ENERGÍA (directa en el uso de energía y combustible para producir el bien)		
	Cantidad	Unidades
Electricidad		
Gas natural		
Electricidad		

RESIDUOS SÓLIDOS			
Tipo de residuos	Cantidad	Unidades	Disposición final
Desechos del proceso			
Chatarra no reciclada			
Residuos recogidos en dispositivos de control de emisiones			

Residuos de empaque no reciclados				
EMISIONES (reportar la cantidad de cada una de las sustancias liberadas luego del control de las emisiones o el tratamiento del agua residual)				
Nombre	Cantidad	Unidades	Indicación de las emisiones	
			Procesos	Emisiones
Descripción del procedimiento de muestreo:				
VERTIMIENTOS AL AGUA Y/O SUELO				
Nombre	Cantidad	Unidades	Indicación de emisiones	
			Proceso	Emisiones
Descripción del procedimiento de muestreo:				
ENVASADO PARA ENVÍO SALIENTE				
			Cantidad	Unidades de producto por unidad de envío
Producto enviado en unidades de…				
Lista de materiales utilizados por unidad de envío de producto (cajas de cartón corrugado, fundas de película plástica, etc.)				
Materiales de empaque			Cantidad	Unidades

MÉTODO Y FUENTE DE RECOLECCIÓN DE DATOS (Para cada flujo, marcar la casilla correspondiente que describa las fuentes de datos y proporcionar una descripción adicional si es necesario)

	Materiales	Energía	Residuos sólidos	Emisiones
Medición directa	X			
Registros de compra / utilidad de la compañía				
Calculado a partir de las especificaciones del equipo		x		
Estimaciones de ingeniería				
Límites permisibles				
Otro				
Descripción:				

¿Se ha utilizado extrapolación o asignación durante la recopilación de datos? Si es así, ¿de qué manera?
TRANSPORTE

Nombre del producto intermedio	Distancia	Capacidad del camión	Carga real	Regreso vacío
TRANSPORTE INTERNO				

Diésel	Cantidad total de entradas transportadas	Consumo total de combustible
Gasolina		
GLP (Gas Licuado del Petróleo)		

Fuente: NTC-ISO 14044:2007

Anexo B: ICV de artículos científicos

A continuación, se presenta el ICV de los artículos encontrados sobre el ACV del ciclo de vida de la panela identificados en el estado del arte. Cabe señalar que los insumos se encuentran referenciados respecto a la unidad funcional de cada estudio, donde (Castañeda-Suárez et al., 2017) toman como UF 1 ton de panela, mientras (Quezada, Moreno et al., 2017) 2845kg.

Insumo	**(Castañeda-Suárez et al., 2017)**	**(Quezada, Moreno et al., 2017)**
Gasolina (entrada)	11,70 kg	-
Caña de azúcar (entrada)	8,064 ton	20 ton
Jugo crudo (entrada)	-	11,2 ton
Bagazo crudo (salida)	3,63 ton	8,8 ton
Bagazo seco (salida)	-	6914 kg
Bagazo seco (entrada)	-	3379 kg
Aglutinante (entrada)	10,5 g	228,4 kg
Cachaza (salida)	0,322 ton	675,3 kg
Jugo limpio (entrada)	4,27 ton	-
Barros (salida)	-	28 kg
Cal (entrada)	89 g	-
Energía térmica (entrada)	12546211,6 kJ	-
Pérdidas (salida)	-	8,42 kg
Ceniza (salida)	-	90 kg
Jugo clarificado (entrada)	3,95 ton	-
Leña (entrada)	3,63 ton	-
Vapor de agua (salida)	2,944 ton	8232,5 kg

Anexo C: Cálculos del ICV

Balance de masas:

1. Extracción del jugo:

1.1. Consumo caña de azúcar por 1 kg de panela

$$Consumo\ de\ caña = 100\ cargas * \frac{15\ arrobas}{1\ carga} * \frac{11.34\ kg}{1\ arroba}$$

$$= 17010\ kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 11.57 \frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

1.2. Consumo ACPM por 1 kg de panela

$Densidad\ del\ ACPM = 870\ \frac{kg}{m3}$ (Biblioteca Salud Capital, n.d.).

$$Consumo\ de\ ACPM = 5\ gal = \ 0.0189271\ m^3$$

$$Consumo\ de\ ACPM = 870\ \frac{kg}{m3} * \ 0.0189271\ m3 = 16.4666kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela}$$

$$= 0.011202\ \frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

1.3. Consumo de energía térmica del molino por 1 kg de panela:

$Poder\ calorífico\ del\ ACPM = 10900\frac{kCal}{kg} = \ 45.6361\ \frac{MJ}{kg}$ (AChEE, 2016).

$$\text{Consumo de ACPM} = \ 16.4666kg$$

$$\text{Consumo de energía térmica} = 16.4666kg * 45.6361\ \frac{MJ}{kg}$$

$$= 751.471\text{MJ} * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 0.511205 \frac{\text{MJ}}{kgpanela}$$

1.4. Producción de jugo crudo por 1 kg de panela:

Este cálculo fue realizado a partir de las ecuaciones presentes en el documento de (Zambrano, 2005) y de las mediciones realizadas directamente en el trapiche.

$$Producción\ de\ jugo\ crudo = \frac{masa\ de\ panela\ a\ producir * °Brix\ panela}{°Brix\ jc}$$

$$Producción\ de\ jugo\ crudo = \frac{1470\ kg * 91.5}{23.28} = 5777.71\ \text{kg} * \frac{1}{1470\ kg\ panela}$$

$$= 3.93 \frac{kg}{kgpanela}$$

1.5. Producción de bagazo húmedo por 1 kg de panela

$$Producción\ de\ bagazo\ húmedo = caña - jugo\ crudo$$

$$Producción\ de\ bagazo\ húmedo = 11.5714\ \frac{kg}{kgpanela} - 3.9304\frac{kg}{kgpanela}$$

$$= 7.640987\frac{kg}{kgpanela}$$

2. Pre-Limpieza:

2.1. Producción de bagacillo por 1 kg de panela:

$$Producción\ de\ bagacillo = 20kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 0.013605\frac{Kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de medición directa.

2.2. Producción de jugo pre limpiado por 1kg de panela:

$$Producción\ de\ jugo\ prelimpiado = \ jugo\ crudo - \ bagacillo$$

$$Producción\ de\ jugo\ prelimpiado = 3.9304\ kg - 0.0136kg$$

$$= 3.9168\ \frac{Kg}{kgpanela}$$

3. Clarificación:

3.1. Consumo de bagazo seco por 1 kg de panela:

$$Consumo\ de\ bagazo\ seco = 1000kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela}$$

$$= 0.680272\ \frac{Kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

3.2. Consumo de baba de cadillo por 1 kg de panela:

$$Consumo\ de\ baba\ de\ cadillo = 10\ kg\ cadillo + 50\ kg\ agua$$

$$= 60kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 0.040816\frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

3.3. Producción de cachaza por 1 kg de panela:

$$Producción\ de\ cachaza = 80kg * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 0.054422\frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de medición directa.

3.4. Producción de jugo descachazado por 1kg de panela:

$$Producción\ de\ jugo\ descachazado = Jugo\ prelimpiado - cachaza$$

$$= 3.9168\ \frac{kg}{kgpanela} - 0.0544\frac{kg}{kgpanela} = \ 3.8624\frac{kg}{kgpanela}$$

4. Evaporación y concentración:

4.1. Producción de cenizas por 1 kg de panela:

$$Producción\ de\ cenizas = 120kg * \frac{1}{1470\ Kg\ panela} = 0.081632 \frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

4.2. Producción de vapor de agua por 1 kg de panela:

$$Vapor\ agua = Jugo\ descachazado - Panela\ producida$$

$$Vapor\ agua = 3.8624\ \frac{kg}{kgpanela} - 1kg = 2.862400 \frac{kg}{kgpanela}$$

5. Proceso de limpieza:

5.1. Consumo total del recurso hídrico por 1 kg de panela:

Para obtener el consumo total de agua se calculó:

1. Lavado de los utensilios:

$$Volúmen\ de\ alberca = 120cm * 122cm * 33cm = 483120\ cm3 = 0.48312\ m3$$

$$Densidad\ del\ agua = 997 \frac{kg}{m3}$$

$$1. Consumo\ de\ agua = \left(997 \frac{kg}{m3} * 0.48312\ m3\right) * 2\ = 963.34128kg$$

Nota: Para la limpieza de los utensilios se llena el total de la alberca 2 veces al día.

2. Lavado del pozuelo:

$$2. Consumo\ de\ agua = 10L = 0.01\ m3 = 9.97kg$$

3. Llenado de las 2 últimas pailas:

$$Volúmen\ pailas = \ 240L * 2 = 480L = 0.48m3$$

$$3. Consumo\ de\ agua = 0.48m3 * \frac{997Kg}{m3} = 478.56kg$$

4. Limpieza total de las 5 pailas:

$$Volúmen\ pailas = 400L + (320L * 2) + (240L * 2) = 1520L = 1.52m3$$

$$4. Consumo\ de\ agua = \frac{(1.52m3 * \frac{997Kg}{m3})}{2.5\ días} = 606.176kg$$

Nota: El lavado de las pailas se realiza al terminar el proceso en 2.5 días.

$$\text{Consumo total de agua } = 963.34128kg + 9.97kg + 478.56\ Kg + 606.176kg$$

$$= 2058.04728\ kg * \frac{1}{1470kgpanela} = 1.400032 \frac{kg}{kgpanela}$$

$$= 1.404245E - 3 \frac{m3}{kgpanela}$$

Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

5.2. Consumo de hipoclorito de sodio (NaOCl) por 1 kg panela:

$$Consumo\ de\ NaOCl = \frac{2L}{2.5\ días} = 0.8\ L$$

$$Densidad\ del\ NaOCl = 1{,}11\frac{kg}{L}$$

$$Consumo\ de\ NaOCl = 0.8\ L \times \frac{1{,}11Kg}{L} = 0.888kg * \frac{1}{1470kgpanela}$$

$$= 6{,}040816\text{E} - 4\frac{kg}{kgpanela}$$

Nota: Se utiliza NaOCL para el lavado de las pailas, el cual se realiza una vez cada 2.5 días.
Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

5.3. Consumo de detergente en polvo por 1 Kg panela:

$$Consumo\ detergente\ en\ polvo = \frac{1kg}{2.5\ tandas} = 0.4 * \frac{1}{1470kgpanela}$$

$$= 2.721088\text{E} - 4\frac{Kg}{kgpanela}$$

Nota: Se utiliza detergente en polvo para el lavado de las pailas, el cual se realiza una vez cada 2.5 días.
Nota: Valor calculado a partir de entrevista.

5.4. Producción de vertimientos por 1 Kg de panela:

$$\text{Producción de vertimientos} = Agua + NaOCLO + Detergente$$

$$= 1.40003\frac{kg}{kgpanela} + 6.0408e - 4\frac{kg}{kgpanela} + 2.72e$$

$$- 4\frac{Kg}{kgpanela} = 1.400908\ \text{kg} * 0.95 = 1.330862\frac{Kg}{kgpanela}$$

$$= 1.334867E - 3\frac{m3}{kgpanela}$$

Nota: Para este cálculo se estimó una pérdida del lavado de 5%

5.5. Consumo de electricidad por 1 Kg de panela:

$$Consumo\ de\ electricidad = 60W * 7 * 15h = 7140\text{Wh}$$

$$= 7.14\text{KWh} * \frac{1}{1470kgpanela} = 4.857142E - 3\frac{KWh}{kgpanela}$$

Nota: En un día de trabajo se utiliza luz artificial durante 15 horas mediante 7 bombillos convencionales de 60W.

Balance de energía:

6. Emisiones atmosféricas generadas por la hornilla:

Este cálculo fue realizado a partir de los factores de emisión de la EPA, presentes en el documento de (Zambrano, 2005) según el tipo de trapiche. De acuerdo con la clasificación según el tamaño de explotación, se determinó que el trapiche de la finca Las Camelias es pequeño (tipo C), dado que la unidad de producción se encuentra en el rango: 100-150 kg de panela/hora.

Dónde: E: emisión de contaminante, A: Flujo de combustible, FE: factor de emisión

6.1. Emisión de Material particulado

$$A = 1000\frac{kg}{d} = 1\frac{ton}{d}$$

$$FE = 15.6\ \frac{lb}{ton} = 7.076\frac{kg}{ton}$$

$$E = A * FE$$

$$E = 1\frac{ton}{d} * 7.076\frac{kg}{ton} = 7.076\frac{kg}{d} * \frac{1}{1470\ kg\ panela}$$

$$= 4.813605\text{E} - 3\ \frac{kg}{kgpanela} de\ PM$$

6.2. Emisión de NOx

$$FE = 1.2\frac{lb}{ton} = 0.544\frac{kg}{ton}$$

$$E = A * FE$$

$$E = 1\frac{ton}{d} * 0.544\frac{kg}{ton} = 0.544\frac{kg}{d} * \frac{1}{1470\ Kg\ panela}$$

$$= 3.700680\text{E} - 4\ \frac{kg}{kgpanela} de\ NOx\ medidos\ como\ NO2$$

6.3. Emisión de CO_2

$$FE = 1.56\frac{lb}{ton} = 0.708\frac{kg}{ton}$$

$$E = A * FE$$

$$E = 1\frac{ton}{d} * 0.708\frac{kg}{ton} = 0.708\frac{kg}{d} * \frac{1}{1470\ Kg\ panela}$$

$$= 4.816326E - 4\frac{kg}{kgpanela} de\ CO2$$

6.4. Emisión de CO:

No se cuentan con factores de emisión para el bagazo.

7. Energía producida por la hornilla:

Este cálculo fue realizado a partir de las ecuaciones presentes en el documento de (Zambrano, 2005). La eficiencia energética de la hornilla fue tomada con base en el

referente teórico (Observatorio del territorio, 2016), donde indica que los trapiches tradicionales de Colombia se caracterizan por tener una baja eficiencia cercana al 30%.

Dónde:

m_{jc}: masa de jugo de caña; T_e: Temperatura de ebullición del jugo; T_a: Temperatura ambiente; m_{H2O} : masa de agua evaporada; ΔH_v: Calor latente de evaporación del agua (2259 kj/kg); C_P: calor específico del jugo ($3.716 \frac{kj}{kg°C}$); Eff: Eficiencia térmica de la hornilla.

7.1. Calor aprovechado:

$$Q_{aprov} = m_{jc} * (T_e - T_a) * C_P + m_{H2O} * \Delta H_v$$

$$Q_{aprov} = 5777.7kg * (97.1°C - 25°C) * 3.716 \frac{kj}{kg°C} + 4207.7kg * 2259 \frac{kj}{kg}$$

$$Q_{aprov} = 11053176.48KJ = 11053.176\ MJ * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 7.519167 \frac{MJ}{kgpanela}$$

7.2. Calor suministrado:

$$Q_{aprov} = \frac{Q_{sum}}{Eff}$$

$$Q_{sum} = \frac{11053.176\ MJ}{0.3} = 36843.92\ MJ * \frac{1}{1470\ kg\ panela} = 25.063891\ \frac{MJ}{kgpanela}$$

7.3. Calor desperdiciado:

$$Q_{desp} = Q_{sum} - Q_{aprov}$$

$$Q_{desp} = 25.064\ \frac{MJ}{kgpanela} - 7.519167 \frac{MJ}{kgpanela} = 17.544724 \frac{MJ}{kgpanela}$$

Porcentaje de extracción del molino:

$$\%\ de\ extracción = \frac{\text{Jugo crudo} * 100}{\text{Caña de azúcar}} = \frac{3{,}94\text{kg} * 100}{11{,}57\ kg} = 34\%$$

Anexo D: Cálculos de simulación del escenario del sistema:

1. **Consumo de electricidad del motor:**

Para calcular el consumo de electricidad se utilizó el cálculo de potencia real en motores monofásicos presente en la "Guía 9: Cálculo de potencias y factor de potencia"(Ortega, 2007). Los datos de I, V y $Cos\ (\beta)$ fueron proporcionados por empresas que comercializan motores eléctricos, teniendo en cuenta que el motor que se ajusta más a las especificaciones de la finca Las Camelias es uno de 10HP.

Donde:

P: $Potencia\ promedio\ (KWh)$
V: $Tensión\ nominal\ (Voltios)$
I: $Corriente\ (Amperios)$
$Cos\ (\beta)$: $Factor\ de\ la\ potencia\ activa\ en\ una\ corriente\ alterna$

$$P = V \times I \times (Cos\ (\beta))$$

$$p = 120\ V \times 100\ A \times 0{,}73$$
$$p = 8760\ W = 8{,}76\ KW$$

Teniendo en cuenta que en una jornada laboral se trabajan 15 horas y se producen 1470kg de panela, se tiene que el consumo de energía necesario para producir 1 kg de panela es de:

$$Consumo\ de\ energía = \ 8{,}76\ \text{KW} * 15\text{h} * \frac{1}{1470\ \text{kg de panela}}$$
$$= 0{,}101306 \frac{\text{KWh}}{\text{kg de panela}}$$