

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA PRODUCCIÓN PANELERA TRADICIONAL EN COLOMBIA^a

LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE TRADITIONAL PRODUCTION OF PANELA IN COLOMBIA

JUAN CASTAÑEDA^b, ANTONIO GONZÁLEZ^c, CRISTIAN USMA^d, NATALIA ANDREA
CANO LONDOÑO^e

Recibido 14-03-2017, aceptado 12-05-2017, versión final 23-05-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: Teniendo en cuenta la gran producción y demanda panelera en Colombia, es necesario cuantificar las cargas ambientales del proceso productivo con el fin de identificar los componentes del ciclo que requieren una optimización, y así lograr una producción panelera más eficiente y sostenible. Dado que existen pocos estudios de análisis de ciclo de vida sobre la panela en el mundo, y ninguno con suficiente difusión en Colombia, se conoce poco acerca de las cargas ambientales de la producción de este alimento a nivel técnico. En este artículo se presenta el análisis de ciclo de vida como una herramienta necesaria y competente para lograr dicho fin, con el objetivo general de cuantificar las cargas ambientales asociadas a la producción de panela hasta el momento en que está lista para ser empacada, y adicionalmente, determinar la conveniencia de ciertas mejoras tecnológicas en la fase de manufactura.

PALABRAS CLAVE: análisis de ciclo de vida; panela.

ABSTRACT: Taking into account the large production and demand of panela in Colombia, it is necessary to quantify the environmental burdens of its production process, in order to identify the cycle components that require optimization, with the final purpose of achieve a more efficient and sustainable panela production. Because of the lack of available literature about life cycle assessment applied to panela in the world, and the absolute absence of large-diffusion studies in that field in Colombia, the knowledge about environmental burdens of the production of that meal is limited, at least in technic levels. This paper presents life cycle assessment as a necessary and capable tool to achieve that purpose, with the overall goal of quantify the environmental burdens associated with the production of panela until the moment of packaging, and also, determine the suitability of certain technological improvements in the manufacture phase.

^aCastañeda, J., González, A., Usma, C. & Cano, N. (2017). Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 107–122. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.63316

^bFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jecastanedas@unal.edu.co

^cFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. amgonzalezd@unal.edu.co

^dFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. causmar@unal.edu.co

^eFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. nacanol@unal.edu.co.

KEYWORDS: life cycle assessment; panela.

1. INTRODUCCIÓN

La panela es un producto de uso generalizado y habitual para los colombianos, cuya utilización es única, es decir, el producto solamente se puede usar una vez después de elaborado. Esta situación crea una alta demanda representada en el consumo per cápita de panela anual en el país (34.2 *kg/hab*), el cual es el más alto del mundo, (Gualanday, 2013). Las condiciones ambientales para la producción de la panela en Colombia son óptimas, de manera que su materia prima se puede producir en diversas regiones. Un indicador que refleja lo anterior, es el hecho de que el país sea el segundo productor de panela a nivel mundial, sólo por detrás de la India, (Corpoica, Sf; Observatorio Agrociudades Colombia, 2005). Como cualquier otro proceso, la industria panelera trae consigo varias cargas ambientales asociadas a cada fase de su ciclo de vida, que son además potenciadas por la alta demanda del producto. Estas fases pueden ser analizadas con el fin de evaluar el grado de afectación al medio ambiente.

El proceso cuenta con varias fases bien definidas, en las cuales hay entradas y salidas de materia y energía que pueden ser cuantificadas para hallar datos que arrojen información objetiva y útil acerca de las cargas ambientales y demandas de recursos del mismo. Aprovechando las características mencionadas anteriormente, se aplica la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) al proceso de producción panelera con el fin de obtener una aproximación a estas cargas.

La aplicación del análisis de ciclo de vida a la producción panelera hasta el momento ha sido nula. Este fenómeno quizá se deba a la concentración de la producción en unos pocos países y en condiciones poco tecnificadas en general (Soto, 2012; González, 2013). Por esta razón, se considera pertinente realizar este estudio, dado que es pionero en el país y permite hacer un acercamiento preliminar a la identificación y cuantificación de impactos ambientales asociados a este proceso, y encontrar soluciones que permitan optimizar el mismo. Dada la falta de literatura sobre análisis de ciclo de vida aplicado a la producción de panela, este documento se plantea como una primera aproximación general hacia la cuantificación de las cargas ambientales del proceso, que permita y promueva futuros esfuerzos con resultados cada vez más amplios y útiles al respecto.

De acuerdo con lo anterior, en este estudio se busca identificar y cuantificar los impactos asociados a la producción de panela en cada una de sus fases utilizando el ACV, explorando también opciones de mejora que permitan optimizar etapas altamente impactantes del proceso, de acuerdo con los principios del análisis de ciclo de vida consecucional. Para lograr tal propósito, se incluyen en el estudio las categorías de análisis de: ocupación de tierras agrícolas, agotamiento de metales, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad terrestre, cambio climático, toxicidad humana y

formación de material particulado.

La metodología utilizada es ReCiPe, presente en el software alemán Umberto NXT, con la base de datos Ecoinvent 3 (v3.1), además se utiliza como unidad funcional una tonelada (1 *T*) de panela, ya que esta es una magnitud estándar de producción utilizada en los trapiches colombianos. Se sigue además la estructura metodológica propuesta en la norma de estandarización ISO 14041.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA PANELA

El proceso de elaboración tradicional de la panela se muestra de manera esquemática en la figura 1, y sus fases principales se describen a continuación, con base en una guía técnica elaborada por Fedepanela y el Ministerio de Agricultura de Colombia, (Fedepanela, 2011).

2.1. Siembra y cultivo de la caña de azúcar

La siembra y cultivo de la caña se realiza por un periodo de 3 a 4 meses, e incluye el acondicionamiento y tratamiento químico y físico del suelo, para garantizar el adecuado crecimiento y desarrollo de la planta, (Fedepanela, 2011).

2.2. Corte de la caña

Una vez se determina que la planta de caña panelera alcanzó su madurez y una concentración de azúcares óptima, se corta y se organiza, de manera que se remueven las hojas y el cogollo de caña dejando el tallo completamente limpio. Tras esto, los tallos son alzados y dispuestos en el medio de transporte que se utilizará para llevarlos al lugar de procesamiento, (Fedepanela, 2011).

2.3. Transporte de la caña

La caña es llevada hacia el trapiche o ramada, ya sea a lomo de mula o caballo. Se asume que el cultivo está situado a escasos metros del trapiche, por lo cual el transporte no es ambientalmente significativo, (Fedepanela, 2011; Carrillo *et al.*, 2015). El estiércol producto de los animales que utilizan para transportar la caña suele emplearse en el manejo de lombricultivos, para la producción de humus y para la realización de procesos de compostaje. El bagazo y la ceniza producto de etapas posteriores pueden ser utilizados en procesos similares, (Osorio, 2007).

2.4. Recepción, acopio y pesaje

Los tallos de caña son dispuestos en un lugar especial a la entrada del trapiche, donde son organizados y pesados, (Fedepanela, 2011).

2.5. Extracción del jugo

Una vez se ha pesado la cantidad de caña a usar, esta se pasa por un molino en el cual se extrae el jugo, que se dispone en un recipiente receptor, (FedePanela, 2011).

Tabla 1: Inventario en la fase de extracción de jugo.

Materiales	Cantidad
Entra: Gasolina	11.70 <i>kg</i>
Entra: Caña de azúcar	8.064 Toneladas
Sale: Bagazo	3.63 Toneladas

2.6. Filtración y pre-limpieza del jugo

El jugo obtenido se hace pasar por un filtro que retiene las impurezas grandes que se encuentran suspendidas. El filtro debe ser lavado varias veces en el día para garantizar la salubridad de la panela y el buen funcionamiento del sistema. Tras ser filtrado, el jugo pasa a un sistema de recipientes, tuberías y decantadores cuyo diseño varía de acuerdo al nivel de tecnificación del trapiche, y en el cual se busca retirar la mayor cantidad de impurezas posible mediante sedimentación de partículas pesadas o acumulación del ‘bagacillo’ por flotación. Este sistema es el que realiza la pre-limpieza del jugo, (FedePanela, 2011).

Tabla 2: Inventario en la fase de filtración y pre-limpieza.

Materiales	Cantidad
Sale: Bagazo	3.63 <i>kg</i>

2.7. Descachazado

El jugo filtrado y pre limpiado pasa a una primera hornilla, en la cual se le aplica una solución aglutinante que permite retirar las impurezas disueltas en el jugo, es decir, la cachaza. Esta cachaza se dispone en otro recipiente y se seca, para así producir un subproducto llamado melote. En esta fase se revisa el pH del jugo, para establecer si su acidez es la correcta o si se requiere aplicar algún regulador de pH, (FedePanela, 2011).

Tabla 3: Inventario en la fase de descachazado.

Materiales	Cantidad
Entra: Aglutinante	10.5 <i>g</i>
Entra: Cachaza	0.322 Toneladas
Sale: Jugo limpio	4.27 Toneladas

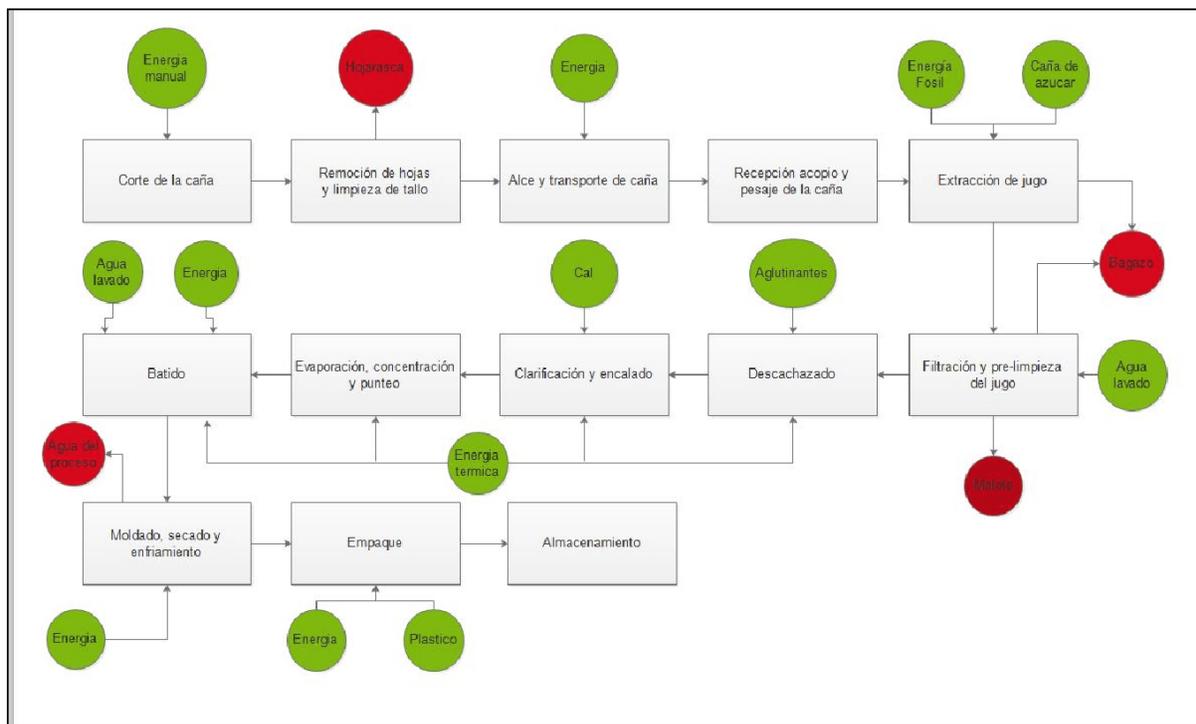


Figura 1: Descripción del proceso. Fuente: Elaboración propia

2.8. Clarificación y encalado

La miel descachazada se pasa a otra hornilla, en la cual se le aplica cal y se mezcla, (FedePanela, 2011).

Tabla 4: Inventario en la fase de clarificación encalado.

Materiales	Cantidad
Entra: Cal	89 g
Entra: Energía Térmica	12546211.6 kJ

2.9. Modelado, secado y enfriamiento

La miel se hace pasar por varias hornillas sucesivas, en las cuales el calor recibido produce la evaporación de gran parte del agua contenida en el jugo, hasta llegar al ‘punto’ en el cual la miel es lo suficientemente viscosa y se encuentra en un estado adecuado para ser moldeado, (FedePanela, 2011).

Tabla 5: Inventario en la fase de evaporación, concentración y punteo.

Materiales	Cantidad
Entra: Jugo clarificado	3.95 Toneladas
Entra: Leña	3.63 Toneladas
Sale: Agua	2.944 Toneladas

2.10. Batido

La miel punteada se lleva a otro recipiente, en el cual se bate hasta lograr una consistencia deseada, (FedePanela, 2011).

2.11. Evaporación, concentración y punteo

La mezcla batida es llevada a los moldes, en los cuales se seca y se deja enfriar hasta lograr una temperatura razonable, (FedePanela, 2011).

Otros insumos y datos necesarios para el correcto cálculo de las cargas ambientales en el proceso de producción panelero, se recurrió a la siguiente información: Calor específico del jugo de caña (Arias *et al.*, 2016), verificación de la pureza del jugo y cantidad de sólidos suspendidos (Armas & Ramón, 2012), cantidad de gasolina/diesel consumida por hora en el funcionamiento del motor (Royal Condor, 2015).

3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Como se dijo anteriormente, la bibliografía existente acerca del análisis de ciclo de vida aplicado a la panela no es lo suficientemente completa para realizar comparaciones, no siendo posible formar una base bibliográfica sólida a partir de la cual ejecutar estudios en este tema.

Por otro lado, el producto más similar a la panela, del cual se tiene un estudio ambiental disponible es el azúcar. Aunque este estudio no va más allá de la descripción netamente cualitativa en las dimensiones de análisis de la gestión ambiental, promueve un acercamiento a la comprensión de las cargas ambientales producto del procesado de la caña de azúcar. Sin embargo, para los objetivos de este estudio, el entendimiento de la producción del azúcar no aporta nada al entendimiento de la producción de panela, pues estos procesos se desarrollan igual hasta la concentración del jugo de la caña; diferenciándose fuertemente en las fases siguientes, limitando de esta manera el campo y certeza de aplicación de las medidas de mejora que se deseen desarrollar, (Trujillo, 2011).

3.1. Materiales y métodos

Como se dijo anteriormente, se siguen los lineamientos de la metodología estandarizada por la norma ISO 14041. Inicialmente se seleccionaron la totalidad de las categorías de impacto disponibles, con

el fin de hacer un análisis lo más completo posible. Tras correr el software, se seleccionaron para el análisis únicamente las categorías cuya carga ambiental fuera superior a 1 punto. Las categorías de impacto contempladas son las siguientes:

- Ocupación de tierras agrícolas.
- Agotamiento de metales.
- Agotamiento de combustibles fósiles.
- Ecotoxicidad terrestre.
- Cambio climático.
- Toxicidad humana.
- Formación de material particulado.

3.2. Alcance y objetivo

El objetivo de este estudio es la cuantificación de la carga ambiental asociada al proceso de producción de panela de manera tradicional mediante la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV), comenzando desde la producción de la caña hasta la solidificación de la panela, excluyendo fases posteriores como el empaquetado y el transporte hasta el distribuidor y el consumidor final, esto debido a la gran variabilidad de métodos que existen para la ejecución de estas etapas, que representan en general una diferencia en la magnitud de los impactos y dificultades para su cuantificación, alejándose también del objetivo principal del estudio. A pesar de que las cargas ambientales se evalúan a lo largo de todo el proceso desde la producción de la caña, sólo se proponen mejoras para la fase de manufactura.

3.3. Unidad funcional

La unidad funcional conveniente para los objetivos del estudio es una tonelada de panela. La decisión de seleccionar esta unidad se tomó dada la facilidad y practicidad para el levantamiento de la información apropiada, además de que esta se aproxima a las unidades de producción estándar del trapiche.

3.4. Inventario de ciclo de vida

En las Tablas 1 a 5 se presentan las cantidades de materiales y emisiones asociadas a la producción de la unidad funcional del estudio (una tonelada de panela) para cada etapa del proceso. Es de anotar que no se incluyen los materiales y emisiones asociados a la producción de algunos componentes como la caña y el diesel que alimenta el trapiche, debido a que su inclusión en el ciclo de vida en

Umberto NXT LCA se hizo por medio de la herramienta ‘expandir’, a través de la cual se incluyeron una gran cantidad de entradas y salidas que no sería conveniente listar en el presente estudio para efectos de practicidad y claridad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del proceso

Los resultados, normalizados y ponderados, de la evaluación del proceso de producción de panela a través del ACV se resumen en la tabla 6 y se muestra gráficamente en la figura 2. Según los datos obtenidos, las cargas ambientales del proceso de producción panelera se concentran de manera preponderante en la fase de extracción de materias primas, y presentan un mínimo aporte de la fase de manufactura.

Tabla 6: Resultados del ACV para el proceso sin modificar en Endpoints.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.79	51.27	0.51
	Cambio climático	7.02	6	1.02
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.32	0
60.76				
Salud humana	Cambio climático	11.1	9.49	1.61
	Toxicidad humana	1.8	1.78	0.02
	Formación de material particulado	9.12	6.72	2.4
22.3				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	11.95	8.84	3.12
	Agotamiento de metales	1.56	1.54	0.02
Total	Proceso de producción de panela	96.57		

Lo anterior se verifica observando la carga ambiental obtenida para la categoría de impacto Ocupación de tierras (51.79 puntos) en contraste con los resultados de las demás. En cuanto a la fase de manufactura, se puede apreciar que las dos categorías más impactadas son Agotamiento de combustibles fósiles (3.12 puntos) y Formación de material particulado (2.4 puntos). Lo primero se puede explicar por el uso de combustibles fósiles para el funcionamiento del motor del trapiche que realiza la extracción del jugo de la caña, (Carrillo *et al.*, 2015) y lo segundo debido a la utilización de leña y/o bagazo para el funcionamiento de las hornillas que evaporan el agua del jugo que pasará a ser panela.

Como se mencionó anteriormente, Umberto NXT LCA asigna al proceso más categorías de impacto de las que fueron analizadas, sin embargo, estas no fueron tomadas en cuenta puesto que sus cargas no fueron significativas comparadas con la carga ambiental total del proceso y con las cargas específicas de las categorías seleccionadas.

El criterio de selección fue la comparación en términos de Endpoints (unidades de impacto ponderadas y normalizadas) de las diferentes categorías. Es de anotar que la carga ambiental total del proceso corresponde a 96.57 puntos, incluyendo las categorías de impacto que fueron omitidas debido a su poco peso en comparación con el impacto ambiental total del proceso.

4.2. Optimización del proceso: Etapa de evaporación y concentración

Como se mencionó en la sección 2.9, la evaporación y concentración del jugo se realiza en hornillas que reciben calor proveniente del proceso de combustión del bagazo de la caña y se complementa con la utilización de otros productos de fácil combustión.

En este proceso se libera calor y cenizas al ambiente que se traducen en un aumento de la carga ambiental del proceso, especialmente en la categoría de impacto de Formación de material particulado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso utilizar hornillas cuya fuente de calor sea la combustión del gas propano. La selección de dicho gas se fundamenta en su poder calorífico (mayor que el del gas natural) lo cual lo hace apto para el uso industrial, a pesar de su mayor costo. El gas propano debería reducir la emisión de material particulado al ambiente. Para determinar la certeza de esta hipótesis y saber qué tan conveniente era realizar el cambio, se evaluó en Umberto NXT LCA nuevamente el proceso y se hizo el respectivo análisis de los resultados, tanto para esta misma categoría como para el resultado global del proceso.

4.3. Optimización del proceso: Resultados gas propano

Como se puede apreciar en la Tabla 7, aunque la carga ambiental para la categoría Formación de material particulado se redujo sustancialmente con la utilización de gas propano como fuente de calor para las hornillas, la carga total del proceso creció en 0.34 puntos con respecto a la carga asociada al proceso sin modificaciones (Tabla 6). Además, las categorías de impacto que fueron omitidas anteriormente sufrieron un aumento en su carga ambiental, sin embargo, son también despreciables. Esta situación tiene sentido porque aunque el cambio a gas propano signifique una mejora en la calidad ambiental medida en una categoría (Formación de material particulado), esto no significa que el proceso sea más óptimo visto de manera global. De hecho, comparando las Tablas 6 y 7 se puede observar que la carga ambiental aumentó sobre varias categorías, como Cambio climático.

Tabla 7: Resultados del ACV para el proceso modificado con gas propano.

Categorías de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.79	51.78	0.0051
	Cambio climático	8.02	5.995	2.0243
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.31	0.0039
61.76				
Salud humana	Cambio climático	12.69	9.49	3.1966
	Toxicidad humana	1.80	1.78	0.0017
	Formación de material particulado	6.88	6.72	0.1565
21.65				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	11.65	8.84	3.1011
	Agotamiento de metales	1.56	1.542	0.0174
13.51				
Total	Proceso de producción de panela	96.91		

4.4. Agotamiento de combustibles fósiles

En conclusión, en términos generales la mejor opción es usar bagazo pese a que es el insumo cuya utilización es la que conlleva cierta contaminación, pues la disminución del impacto en la Formación de material particulado mediante el uso de gas propano se neutraliza con el aumento en otras categorías de impacto.

Por otro lado, si se analizan los resultados en unidades equivalentes, todas las cantidades emitidas permanecieron iguales, a excepción de las categorías de Cambio climático y Formación de material particulado, esto se puede constatar en las Tablas 9 y 10.

4.5. Optimización del proceso: Etapa de extracción del jugo de caña

En la fase de molienda actualmente se utilizan motores diesel para el funcionamiento del trapiche que extrae el jugo de la caña. Las cargas asociadas a la combustión de este derivado del petróleo se manifiestan especialmente en categorías de impacto como la Formación de material particulado, Cambio climático y Agotamiento de combustibles fósiles. Para optimizar esta fase se propuso el reemplazo del motor diesel por un motor eléctrico.

4.6. Optimización del proceso: Resultados motor eléctricos

En la Tabla 8 se resume la carga ambiental del proceso de producción de panela con la modificación propuesta en la fase de la extracción del jugo de caña.

La carga ambiental total del proceso se redujo en 3.82 puntos. Esto indica que el uso un motor

eléctrico para la extracción del jugo de caña en general mejora la eficiencia del proceso en términos ambientales, lo cual se manifiesta en la reducción de la carga ambiental para las categorías que se mencionaron anteriormente.

Nuevamente se hizo el proceso de descartar las categorías que no tuvieran un aporte significativo a la carga ambiental del proceso, resultando ser las mismas categorías descartadas al comienzo y con la modificación del gas propano.

Se concluye entonces que el uso de un motor eléctrico para el funcionamiento del trapiche hace más eficiente en términos ambientales al proceso de producción panelera.

4.7. Resultados combinación motor eléctrico - gas propano

Como es posible observar en la Tabla 13, las mayores mejoras se obtuvieron cuando se combinaron las dos alternativas, el gas propano, y el motor eléctrico, pasando de un impacto total de 96.57 a 90.48 puntos, es decir, una reducción de 6.09 puntos en el impacto ambiental total con respecto a la producción tradicional.

4.8. Unidades equivalentes

En las Tablas 9 a 12 se presentan los resultados en términos de unidades equivalentes para cada categoría de impacto estudiada en el proceso. Esto con el fin de visualizar el aporte de cada una en sus unidades de medida propia. Es importante resaltar que en ningún momento se descartaron las otras categorías que Recipe arroja por criterio de comparación, pues hacerlo sería cometer un error ya que así se estaría menospreciando la posibilidad de que un valor pequeño en Midpoints pueda terminar en una gran carga ambiental en Endpoints.

Tabla 8: Resultados del ACV para el proceso sin modificar en Endpoints.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.78	51.78	0
	Cambio climático	6.83	6.0047	0.8253
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.32	0
60.45				
Salud humana	Cambio climático	10.80	9.4963	1.3037
	Toxicidad humana	1.79	1.7883	0.0017
	Formación de material particulado	8.79	6.5363	2.2537
21.82				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	8.92	8.8429	0.0771
	Agotamiento de metales	1.54	1.5368	0.0032
10.46				
Total	Proceso de producción de panela	92.75		

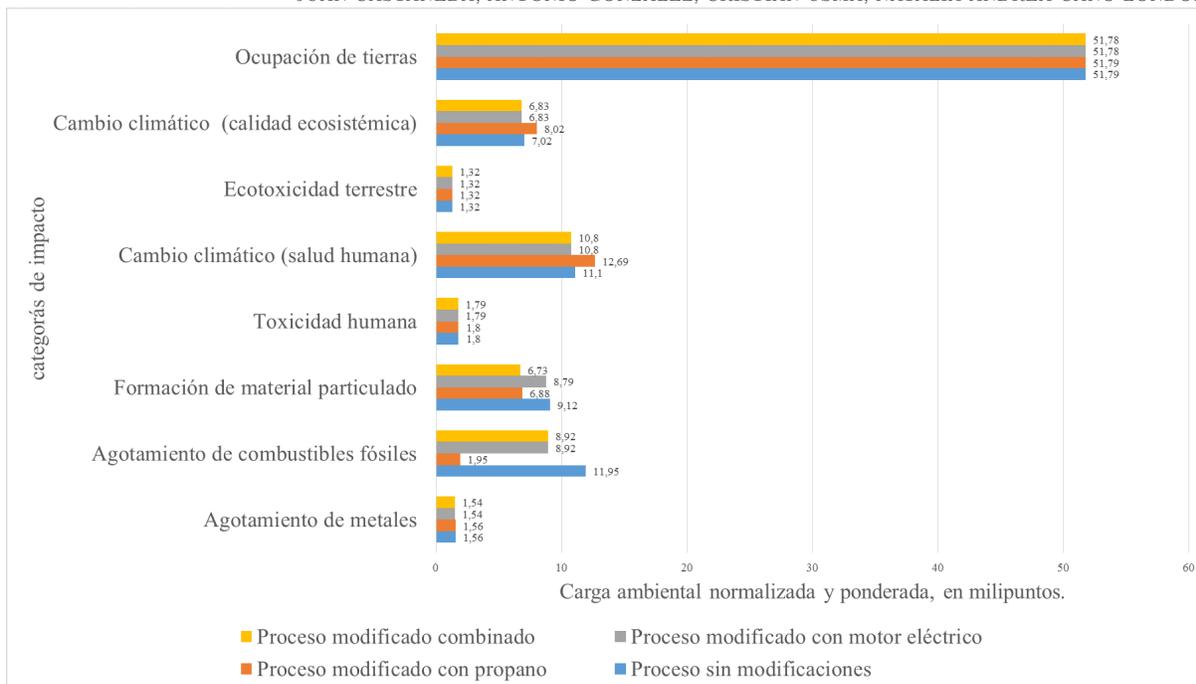


Figura 2: Carga ambiental para la fase de manufactura, para los 4 escenarios posibles.

Tabla 9: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso sin modificar.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	314.08 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.31 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,329.91 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.77 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	93.76 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.54 kg Fe-Eq

Tabla 10: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con propano.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	371.51 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.31 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,329.91 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.34 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	93.76 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.54 kg Fe-Eq

Tabla 11: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con motor eléctrico.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	303.98 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.30 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,241.21 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.74 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	69.77 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.23 kg Fe-Eq

Tabla 12: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con propano y motor eléctrico.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	303.98 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.30 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,241.21 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.31 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	69.77 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.23 kg Fe-Eq

Tabla 13: Resultados del ACV para el uso de motores eléctricos.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica 60.45	Ocupación de tierra agrícola	51.78	51.78	0
	Cambio climático	6.83	6.0035	0.8265
	Ecotoxicidad terrestre	1.32	1.32	0
Salud humana 19.57	Cambio climático	10.80	9.4963	1.3037
	Toxicidad humana	1.79	1.7883	0.0017
	Formación de material particulado	6.73	6.7166	0.0134
Recursos 10.46	Agotamiento de combustibles fósiles	8.92	8.8429	0.0771
	Agotamiento de metales	1.54	1.5368	0.0032
Total	Proceso de producción de panela	90.48		

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, se hace evidente que la fase de materias primas (producción de la caña) concentra la mayoría de las cargas ambientales del proceso. Sin embargo, las mejoras propuestas de modificaciones inicialmente se canalizaron hacia la etapa de manufactura.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida del proceso con mejoras, se demostró que el proceso de producción de la panela no es completamente eficiente. Las cargas ambientales de la fase de manufactura se concentraron en la extracción de la caña y en la evaporación y concentración. Por esta razón, se decidió proponer medidas de optimización en estos procesos.

Se pudo observar que un hipotético reemplazo del uso de bagazo por el uso de gas propano para realizar esta evaporación no sería conveniente ambientalmente, pues la carga ambiental total terminaría aumentando. Por ejemplo, la categoría de impacto de Cambio climático en la categoría de análisis de calidad ecosistémica se pasaría de 7.02 puntos a 8.02; y en la categoría de impacto de Cambio climático en la categoría de análisis de salud humana se pasaría de 11.1 puntos a 12.69. Además, la utilización de gas propano implicaría la compra de este insumo, lo que generaría un aumento en los gastos económicos y un problema respecto a la disposición final del bagazo generado.

Se concluye entonces que es preferible seguir utilizando el bagazo de caña en vez de cambiar a gas propano. Por otro lado, se propuso el cambio del motor diesel por un motor eléctrico para el funcionamiento del trapiche que extrae el jugo de la caña. Con esta optimización se obtuvo una reducción en las cargas ambientales de todas las categorías de impacto relevantes y de la carga ambiental global. La mayor mejora en este aspecto se vio en la categoría de impacto de Agotamiento de combustibles fósiles, en la cual se pasó de 11.95 puntos a 8.92, sin ningún aumento en las cargas sobre las otras categorías analizadas. Se concluye entonces que esta optimización es ambientalmente conveniente.

Existen muchas otras modificaciones que se pueden hacer al proceso de producción panelera y pueden traer beneficios, por ejemplo, en algunas zonas de Colombia se utilizan sistemas de evaporación múltiple para un mayor ahorro de vapor y combustibles fósiles.

La fase de producción de la caña, la cual concentra la mayoría de las cargas ambientales, merece también recibir atención en materia de cuantificación de la reducción en los impactos tras involucrar mejoras en las prácticas agrícolas. En aplicaciones futuras del análisis de ciclo de vida a la producción de panela, sería conveniente tener en cuenta estas modificaciones para determinar cuantitativamente su efecto e impacto ambiental en el marco de la cadena productiva.

Referencias

- Arias, S., Ceballos, A., Gutiérrez, L. (2016). Experimental determination of thermal and physical properties for cane juice, cane syrup and panela. *23*, S145-S148.
- Armas, F., Ramón, A. (2012). Rendimiento agroindustrial en la producción de panela granulada de variedades certificadas de caña de azúcar, de origen cubano y nacionales sembradas desde los 400 hasta los 1000 msnm en la provincia de Morona, Santiago, Ecuador. [En línea]. MAGAP, Ecuador. [Consultada en octubre de 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/INGPAKOWPN/rendimiento-agro-industrial-en-la-produccion-de-panela-granulada-de-variedades-certificadas-de-caa-de-azcar>.
- Carrillo, D., Ocampo, J., Serna, V. (2015). Balance de materia y energía, proceso industrial: elaboración de la panela. [En línea]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://docslide.us/documents/descripcion-del-proceso-y-memorias-de-calculo-produccion-de-la-panela-balance.html>.
- CORPOICA. (Sin fecha). Estudio de mercado de la panela en Colombia y el mundo. [En línea]. Panela Monitor. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/estudio-del-mercado-de-la-panela-en-colombia-y-el-mundo.pdf>.
- FedePanela. (2011). Guía Técnica para Producción de Panela. [En línea]. YouTube. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=to6UzIgrQsQ>.
- González, L. (2013). Gestión en la producción panelera, municipio de Villeta Cundinamarca. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana.
- Gualanday, Trapiche panelero en Yolombó. (2013). La Panela. [En línea]. Yolombó. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.trapichepanelerogualanday.com/panela.html>.
- Observatorio Agrocadenas Colombia. (2005). La cadena agroindustrial de la panela en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica (1991-2005). [En línea]. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/la-cadena-agroindustrial-de-la-panela-en-colombia.pdf>
- Osorio, G. (2007). Manual: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela. [En línea]. FAO. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.fao.org/co/manualpanela.pdf>.
- Royal Condor. (2015). Ficha técnica motores a gasolina y diesel. [En línea]. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.royalcondor.com/motores>.

Soto, M. (2012). Análisis del impacto ambiental y del desarrollo humano y social, producto del procesamiento de la caña panelera en las veredas Salen, Idolos y Betania en el municipio de Isnos departamento del Huila. Universidad de Manizales.

Trujillo, M. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. Orizaba.

Velásquez, H., Janna, F., Agudelo, A. (2005). Diagnóstico exergético de los procesos productivos de panela en Colombia. [En línea]. Universidad Nacional de Colombia. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/diagnostico-exergetico-de-los-procesos-productivos-de-la-panela-en-colombia.pdf>.