

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS IMPACTOS
AMBIENTALES: CASO DE ESTUDIO CAFFENIO”**

TRABAJO ESCRITO

TODO · LO · ILUMINAN

**Que para obtener el GRADO de
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD**

Presenta:

María Alejandra Varela Sortillón

Director de Tesis:

Dra. Nora Elba Munguía Vega

HERMOSILLO, SONORA

Febrero 2015

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

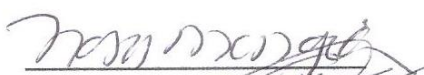



Universidad de Sonora
División de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Posgrado en Sustentabilidad
Maestría en Sustentabilidad
Especialidad en Desarrollo Sustentable

Hermosillo, Sonora a 03 de febrero del 2015

Dra. Nora Elba Munguía Vega
Coordinadora de Programa
Maestría en Sustentabilidad
Presente.-

Por este conducto, hago de su conocimiento que estoy de acuerdo que se realice el examen de posgrado del alumno (a) María Alejandra Varela Sortillón con Expediente 213190032, el cual será el día 03 de febrero del 2015 en el aula 201, Edificio 5M a las 12:30 horas.

Relación de Jurados:

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE:	Dra. Nora Elba Munguía Vega	
SECRETARIO:	Dr. Javier Esquer Peralta	
VOCAL:	Dra. Andrea Zavala Reyna	
SUPLENTE:	Dr. Luis Eduardo Velázquez Contreras	

ATENTAMENTE

MIEMBROS DEL JURADO

RESUMEN

Este estudio presenta una evaluación del desempeño ambiental del proceso de tostado de café en la empresa *Café del Pacífico, S.A.P.I. de C.V.* ubicada en la ciudad de Hermosillo, Sonora; bajo la herramienta Análisis de Ciclo de Vida. Se cuantificaron los flujos de materiales y energía para la producción anual de 2 300 tons de granos de café tostado empaquetado (unidad funcional) para su clasificación en las siguientes categorías de impacto: Cambio Climático, Agotamiento de Combustibles Fósiles, Formación de Material Particulado, Formación de Oxidantes Fotoquímicos, Acidificación Terrestre y Agotamiento de la Capa de Ozono. Los resultados revelan que la principal sustancia emitida es el dióxido de carbono, mientras que la etapa del tostado es donde se tiene el mayor consumo de energía eléctrica. La evaluación de impacto muestra que el tostado y empaquetado son las etapas de mayor afectación ambiental; debido al uso de energía eléctrica, emisiones atmosféricas y el uso de materiales de empaque a base de petróleo. Se recomienda la instalación de medidores individuales de gas lp y energía eléctrica en las distintas etapas del proceso; así como, evaluar la instalación de un sistema de monitoreo continuo de emisiones atmosféricas. Instalación de nueva tecnología de abatimiento en la etapa de tostado, particularmente el sistema de oxidación catalítica regenerativa. Finalmente, la instalación de un sistema fotovoltaico para el consumo de energía eléctrica del proceso de producción de granos de café tostado.

Palabras clave: ACV, café tostado, México, impacto ambiental, ciclo de vida

ABSTRACT

This study presents an environmental performance evaluation of the coffee roasting process at the company *Café del Pacífico, S.A.P.I. de C.V.* located in the city of Hermosillo, Sonora; using the Life Cycle Assessment methodological tool. A quantification of the energy and material flows for the annual production of 2 300 tons of packaged roasted coffee (functional unit) was carried out for their classification in to the following impact categories: Climate Change, Fossil Depletion, Particulate Matter Formation, Photochemical Oxidant Formation, Terrestrial Acidification and Ozone Depletion. Results show that the main air emission pollutant is carbon dioxide, while the roasting is the most energy consuming stage. Impact assessment shows that roasting and packaging stages affect the most in all impact categories; due to energy use, air emissions and oil based packaging materials. It is recommended to install individual measuring devices for electricity consumption and liquefied petroleum gas at the different areas of the coffee plant; as well as evaluate installation of a system for continuous monitoring of air emissions. Installation of new abatement technology for the roasting stage, particularly the regenerative catalytic oxidizer system. Finally, installation of a photovoltaic system to supply electricity consumption in the coffee roasting process.

Key words: LCA, roasted coffee, Mexico, environmental impact, life cycle

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, agradezco a Dios todas las bendiciones que me concede.

A mis padres agradezco el apoyo infinito y la confianza de lograr lo que me proponga.

A mi familia, gracias por estar siempre conmigo.

A mis amigos, gracias por ayudarme a superar las dificultades.

A mi tutora, gracias por ayudarme a cumplir mis metas a lo largo de este proyecto.

Gracias a todas las personas que hicieron posible la realización de esta investigación.

“What if I fall?

Oh but my darling, what if you fly?”

- E.H.

ÍNDICE

Índice de contenido

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO ESTRATÉGICO	2
III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
IV. ANÁLISIS LITERARIO	3
4.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	4
4.2. ACV en la industria del café	9
4.3. Herramienta de ACV: Bases de datos comerciales	12
V. METODOLOGÍA	13
5.1. Tipo de estudio	13
5.2. Diseño metodológico	13
5.2.1 Definición del objetivo y alcance	14
5.2.2 Análisis de Inventario	15
5.2.3 Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida.....	17
5.3. Objeto de estudio	17
VI. RESULTADOS.....	18
6.1 Análisis del Inventario	18
6.2 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.....	25
6.2.1 Metodología de evaluación de impactos ReCiPe 2008.....	25
6.2.2 Metodología de evaluación de impactos IMPACT 2002+	29
VII. DISCUSIÓN.....	31
7.1 Factibilidad económica de las tecnologías de abatimiento.....	38
7.2 Factibilidad económica de la instalación de un sistema fotovoltaico (SFV)	39
6.1.1 Análisis costo - beneficio	42
VIII. CONCLUSIONES.....	44
IX. RECOMENDACIONES	45
X. REFERENCIAS.....	46

Índice de Tablas

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
Tabla 1. Hoja de datos para procesos unitarios.....	16
Tabla 2. Hoja de datos del análisis de inventario del ciclo de vida.....	16
Tabla 3. Categorías de Impacto.....	17
Tabla 4. Parámetros operativos de los tostadores.....	19
Tabla 5. Consumo de energía eléctrica por etapa.....	21
Tabla 6. Factores de emisión para el café tostado.....	22
Tabla 7. ICV para la producción de 2 300 tons de café tostado empaquetado (UF).....	24
Tabla 8. Resultados de la EICV (ReCiPe 2008).....	25
Tabla 9. Factores de normalización ReCiPe 2008.....	27
Tabla 10. Resultados de la EICV (IMPACT 2002+).....	29
Tabla 11. Especificaciones de las tecnologías de abatimiento.....	39
Tabla 12. Especificaciones del SFV potencial en la planta.....	40
Tabla 13. Generación y ahorro mensual del SFV en la planta Caffenio.....	41
Tabla 14. Datos representativos para el análisis costo – beneficio del SFV.....	43

Índice de Figuras

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
Figura 1. Componentes del ACV de cuna a tumba y cuna a puerta.....	5
Figura 2. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.....	6
Figura 3. Ciclo de Vida del café.....	10
Figura 4. Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida.....	13
Figura 5. Proceso de torrefacción del café.....	19
Figura 6. Límites del sistema y flujos de entradas / salidas.....	20
Figura 7. Principales contaminantes.....	23
Figura 8. Principales contaminantes por etapa del proceso.....	23
Figura 9. Caracterización relativa de la EICV por etapa (ReCiPe midpoint).....	26
Figura 10. Caracterización relativa de la EICV (ReCiPe endpoint).....	27
Figura 11. Normalización de la EICV (ReCiPe midpoint).....	28
Figura 12. Normalización de la EICV por etapas (ReCiPe endpoint).....	28
Figura 13. Caracterización relativa de la EICV (IMPACT 2002+).....	30
Figura 14. Caracterización relativa por daño de la EICV (IMPACT 2002+).....	30
Figura 15. Ahorro mensual por la instalación del SFV en la planta Caffenio.....	41

Índice de Anexos

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
Anexo 01. Datos técnicos del equipo eléctrico.....	53

I. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en la planta de tostado de café de la empresa Café del Pacífico S.A P.I de C.V de la ciudad de Hermosillo, Sonora con la finalidad de evaluar su desempeño ambiental incluyendo cada una de las etapas de su proceso productivo desde el procesamiento de su materia prima hasta su producción. Lo anterior a través de la aplicación de la herramienta metodológica Análisis de Ciclo de Vida basada en la Plataforma Europea compatible con las normas ISO 14040 y 14044 sobre gestión ambiental. Se inició con el diagnóstico de los flujos de energía y materiales de las entradas y salidas para cada una de las etapas del proceso de la producción anual de la unidad funcional definida en 2 300 tons de café tostado empaquetado.

A continuación se evaluaron las cargas ambientales asociadas a dichos flujos mediante su clasificación en distintas categorías de impacto y posterior caracterización bajo los métodos ReCiPe e IMPACT 2002+. Los resultados expresan como principal sustancia contaminante al dióxido de carbono, siendo las etapas de tostado y empaquetado donde se genera la mayor emisión de contaminantes en el sistema bajo estudio. Al mismo tiempo, ambas etapas son responsables de la mayor aportación de impacto ambiental en cada una de las categorías analizadas, debido principalmente al consumo de energía proveniente de fuentes fósiles en ambas etapas y al uso de materiales de empaque fabricados a base de petróleo en la etapa de empaquetado.

El análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de impactos permitió la redacción de un documento que facilita la toma de decisiones estratégicas para transitar hacia patrones de consumo y producción sustentables en el proceso productivo de café tostado con el propósito de mejorar su desempeño ambiental. Dicho instrumento indica que es posible la optimización de los recursos en el caso de estudio mediante el cambio hacia el consumo de fuentes de energía renovables para el abastecimiento en la planta de producción; así como, el uso de tecnologías de abatimiento de las emisiones al aire que además faciliten el reuso de las energía calorífica de los gases. Asimismo, se recomienda la instalación de dispositivos de medición de la energía en las distintas etapas del proceso para cuantificar y evaluar continuamente el consumo energético en el proceso.

II. OBJETIVO ESTRATÉGICO

Transitar hacia patrones de producción y consumo sustentables durante el ciclo de vida del café tostado.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Analizar el estado del arte referente, más no limitado, al Análisis del Ciclo de Vida (ACV) desde un enfoque sustentable del café tostado.
- ❖ Diagnosticar en base a la Plataforma Europea sobre Análisis del Ciclo de Vida (compatible con las normas ISO 14040 y 14044) las fases del café tostado en la etapa de procesamiento de la materia prima y su producción.
- ❖ Evaluar las cargas ambientales asociadas a la fabricación de café tostado que favorezcan un mejor desempeño ambiental.
- ❖ Generar un instrumento que optimice la toma de decisiones estratégicas para un mejor desempeño ambiental durante el proceso de producción del café tostado.

IV. ANÁLISIS LITERARIO

El desarrollo sustentable considera asuntos relevantes de economía, equidad social y el medio ambiente para la satisfacción de las necesidades humanas actuales y futuras, por lo cual se requiere la modificación de los patrones de consumo y producción de las sociedades hacia nuevos modelos sustentables que precisan conocer el desempeño ambiental de los productos disponibles en el mercado (Bratt et al., 2011).

Es evidente entonces la necesidad de considerar los conceptos de sustentabilidad como pilares fundamentales en la estrategia de negocios de las empresas para lograr conseguir exitosamente los principios de desarrollo sustentable que son demandados por la legislación ambiental y la sociedad en los productos que consumen (Verghese et al., 2012a). Al mismo tiempo, el aumento constante en la demanda de producción de bienes y servicios ocasiona la extracción de enormes cantidades de recursos no renovables y la emisión continua de contaminantes al ambiente, remarcando la importancia de aplicar acciones específicas en las industrias para abordar dicha problemática (Jacquemin et al., 2012).

Igualmente, las prácticas industriales hoy en día dan prioridad al impacto económico potencial en su toma de decisiones dejando de lado aspectos ambientales que se ven afectados durante el ciclo de vida de un producto (Nikbakhsh, 2009). A pesar de ello, en el trabajo de Edwards (2009) se menciona el creciente interés en el desarrollo de productos que sean sanos y seguros para el medio ambiente y la sociedad, mientras se busca también la generación de beneficios económicos para las empresas, y teniendo como base fundamental el conocimiento del ciclo de vida de los productos.

La herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una estrategia fundamental para comprender y evaluar los impactos ambientales generados por los productos, cuenta con gran validez para la medición de la sustentabilidad gracias a su vasta aplicación en la comunidad científica y debido a que sus principios están basados en una perspectiva de sistemas lo cual sugiere un enfoque interdisciplinario (Zamagni, 2012). Contrariamente a lo que se ha expresado, de acuerdo a Guinée et al. (2011) el alcance del ACV debe ampliarse desde la consideración limitada de impactos ambientales hacia la inclusión de indicadores económicos y sociales para un enfoque verdaderamente sustentable.

En este mismo sentido, Lourenco et al. (2013) hacen referencia a la importancia de abordar la problemática ambiental de manera multidisciplinaria ya que los factores involucrados en su desarrollo presentan gran complejidad y existe amplia variabilidad de sus causas y efectos; además, son dependientes de su ubicación geográfica y la etapa del ciclo de vida que se analiza.

4.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una herramienta metodológica estandarizada cuya función es la evaluación de los impactos ambientales en la vida de un producto o proceso, desde la extracción de la materia prima, su manufactura, uso y disposición final; con el fin de generar un balance detallado de energía y materiales (Ross et al., 2002). Cuenta con las Normas Internacionales ISO 14040:2006 "Principios y Marco de Referencia" (AENOR, 2006a) e ISO 14044:2006 "Requisitos y Directrices" (AENOR, 2006b) que establecen su estructura general, las cuales han sido complementadas por instituciones de la Unión Europea mediante el ILCD "International Reference Life Cycle Data System" para reducir posibles fallas metodológicas (Antón, 2012).

Con referencia a lo anterior, Jacquemin et al. (2012) describen los distintos enfoques o criterios que existen para llevar a cabo el ACV, el primero de ellos es el denominado de cuna a tumba, el cual abarca cada etapa del ciclo de vida (diseño del producto, adquisición de materia prima, manufactura, distribución, uso y disposición final); el siguiente enfoque es de cuna a puerta, que abarca desde la etapa inicial hasta el producto finalizado en la fábrica, y por último el enfoque de puerta a puerta considera solamente el proceso de manufactura.

Con respecto al enfoque de ACV de cuna a tumba, las ventajas principales de su aplicación es la capacidad de evitar la falta de consideración de etapas fundamentales dentro del sistema económico; así como, la externalización de las cargas ambientales desde una etapa del ciclo de vida hacia otra (Guinée et al., 2004). No obstante, el desarrollo de un ACV de cuna a tumba genera incertidumbres en los resultados obtenidos en las etapas de uso y disposición final de un producto debido a la subjetividad de la información; por ello se sugiere un ACV con enfoque más específico (Figura 1), de cuna a puerta o de puerta a puerta, donde sean consideradas solo aquellas etapas donde el productor tenga influencia

directa sobre la toma de decisiones, como lo son la materia prima y su transporte, la manufactura del producto o su empaquetado (Thorn et al., 2011).

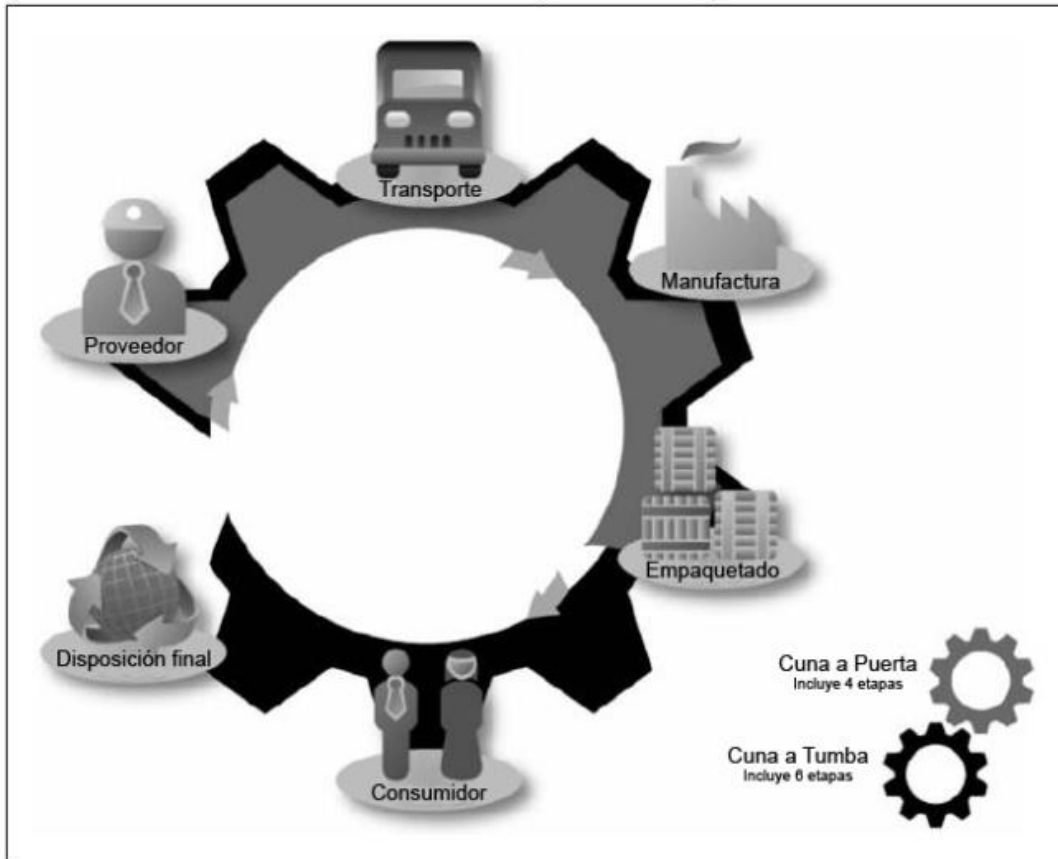


Figura 1. Componentes del ACV de cuna a tumba y cuna a puerta.

Fuente: Thorn et al. (2011)

La metodología aplicada para el ACV (Figura 2) se fundamenta en los criterios de la ISO 14040:2006 (AENOR, 2006a) y consiste en las cuatro fases siguientes: definición del objetivo y alcance, Análisis del Inventario (AI), Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) y finalmente la interpretación de la información; teniendo como meta la identificación de las etapas en donde se generan los mayores riesgos ambientales con el fin de aplicar las medidas correctivas adecuadas y si es posible, modificar el diseño de productos, educar al consumidor y adecuar las políticas de los gobiernos.

Durante la fase de desarrollo del objetivo y alcance se formula la guía principal de todo el ACV, ya que se considera la aplicación esperada de los resultados obtenidos y se establece el propósito del mismo, se toman en cuenta las posibles fallas que puedan presentarse

durante el estudio y se toman importantes decisiones para desarrollo del análisis (De Bruijn et al., 2004). Según se menciona en el libro de Baumann y Tillman (2004), un ACV puede tener tres aplicaciones distintas, servir como base para la toma de decisiones, explorar y aprender sobre un sistema o comunicar información relevante a los interesados; donde cada una define los requisitos para el estudio.

Por su parte, la norma ISO 14040:2006 (AENOR, 2006a) recomienda la inclusión de los requerimientos de los datos esperados, las limitaciones del estudio, los supuestos, los procedimientos de asignación y la unidad funcional (UF) a utilizar, la cual es de enorme importancia dentro del ACV al permitir la normalización de los flujos de entrada y salida del sistema bajo estudio y hace posible la comparación entre los resultados de distintos estudios de ciclo de vida.

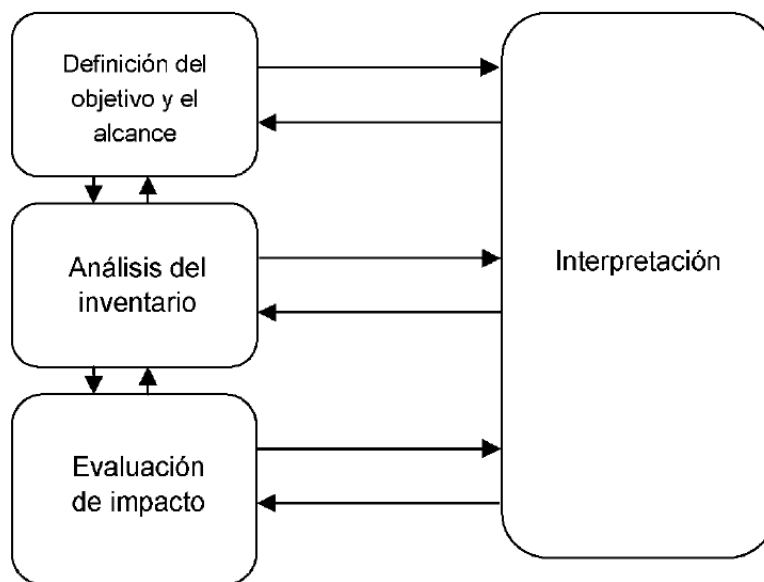


Figura 2. Fases del Análisis de Ciclo de Vida.

Fuente: AENOR (2006a)

Posteriormente, en la fase de AI se realiza la identificación y cuantificación de los flujos de energía y materiales que entran a cada etapa del sistema en forma de insumo y aquellos que son liberados del mismo en forma de emisiones a la atmósfera, agua y suelo; con la finalidad de generar una lista de inventario para su posterior modelación y análisis (AENOR, 2006a).

La fase siguiente es la EICV, cuya estructura está establecida por la ISO 14044:2006 (AENOR, 2006b) e indica que sus elementos obligatorios son la selección de las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización; asimismo, menciona su potencial aplicación en la consideración de aspectos tanto ambientales, como sociales y económicos. De igual forma, en la EICV se realiza la clasificación de los flujos del inventario mediante su agrupación en distintas categorías de impacto según sus efectos en el medio ambiente; dichas categorías son representadas por distintos indicadores ambientales que son cuantificados gracias a factores de caracterización, que hacen posible la determinación de las etapas del ciclo de vida que generan mayor impacto ambiental (Antón, 2012).

De acuerdo a Curran (2006) las categorías de impacto ambiental comúnmente utilizadas son el calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, acidificación, eutrofización, smog fotoquímico, toxicidad terrestre, toxicidad acuática, salud humana, agotamiento de recursos, uso de suelo y uso de agua. Sin embargo, la selección del método y categorías de impacto son dependientes de objetivos del estudio a realizar (Guinée et al., 2004).

En la EICV existen dos enfoques distintos para la clasificación y caracterización de los impactos ambientales: (1) enfoque orientado al problema (midpoint) y (2) el enfoque orientado al daño (endpoint); en el primero, los resultados del AI son clasificados en categorías de impacto ambiental a las cuales contribuyen; por el contrario, en el enfoque orientado al daño los resultados se clasifican en categorías de impacto que expresan daño en tres Áreas de Protección: salud humana, salud de los ecosistemas y recursos naturales (Finnveden et al., 2009). En relación con el enfoque orientado al daño, Huppés et al. (2012) mencionan que aún existe incertidumbre con los resultados que se generan y no se cuenta con una metodología estandarizada para su aplicación.

Finalmente, durante la fase de interpretación de resultados se tiene como objetivo la verificación de la consistencia y validez de la información obtenida en los apartados anteriores de AI y EICV, con la finalidad de cumplir con los objetivos del estudio y lograr generar recomendaciones y/o modificaciones en las etapas de mayor impacto dentro del ciclo de vida (AENOR, 2006b).

Hechas las consideraciones anteriores, el ACV representa un fuente importante de beneficios para las empresas, ya que gracias a su aplicación es posible mejorar el desempeño ambiental de los productos o actividades industriales, logra presentar información relevante a todos los interesados durante la toma de decisiones, mediante los resultados obtenidos se logra la adecuada selección de indicadores de desempeño ambiental de la empresa y la información obtenida puede aplicarse dentro de una estrategia de mercadeo para mejorar la imagen de la empresa y servir como base para certificaciones ambientales (AENOR, 2006a). Cabe agregar que hoy en día la demanda de productos elaborados con la consideración de criterios ambientales está en crecimiento, por lo que las compañías son capaces de generar una ventaja competitiva al aplicar la metodología de ACV (Swarr, 2009).

En ese mismo sentido, dicha metodología fomenta el uso óptimo de los recursos de la empresa y es capaz de evitar la pérdida innecesaria de capital durante el desarrollo de empresas sustentables mediante la cuantificación de las mejoras realizadas en sus procesos dentro de las dimensiones económica, social y ambiental; y a través de la comparación entre el estado actual del sistema de estudio y sus posibles estados futuros (Klöpffer and Renner, 2009).

Se observa claramente la inclusión de nuevas consideraciones dentro de la estructura general del ACV, su enfoque ha evolucionado de abarcar exclusivamente indicadores ambientales hacia incluir además criterios sociales y económicos en su análisis de inventario y por consiguiente en su evaluación de impacto; dicha evolución se considera como una adaptación normal dada la naturaleza del ACV, ya que al pretender evaluar el ciclo de vida de un proceso productivo se requiere considerar todos aquellos aspectos que influyan en el mismo y no solamente las afectaciones ambientales (Heijungs et al., 2012). Tales consideraciones enriquecen la retroalimentación de información hacia los diseñadores sobre el desempeño de sus productos, permitiendo incrementar el valor económico, social y ambiental de sus diseños, mientras que asisten en la identificación de oportunidades que guíen a la empresa hacia prácticas más sustentables (Verghese et al., 2012b).

4.2. ACV en la industria del café

El café es el segundo producto más comercializado en el mundo después del petróleo (Salomone et al., 2013). En México, es uno de los cultivos más importantes dentro del sector agrícola (INEGI, 2013). Además, su demanda doméstica se ha ido incrementando en los últimos años de acuerdo a la Organización Internacional del Café (ICO, por sus siglas en inglés) (2013). Cabe agregar que tales procesos industriales son responsables de la emisión de considerables cantidades de residuos nocivos para el medio ambiente (Mussatto et al., 2011).

Hechas las consideraciones anteriores, resulta oportuno proponer la aplicación de la metodología de ACV para llevar a cabo la evaluación de los impactos ambientales que son generados a lo largo del proceso productivo del café y al mismo tiempo enriquecer la información sobre la materia (Viere et al., 2011). No obstante, es preciso destacar las principales limitantes de esta metodología en México, entre las principales son la falta de datos de inventario para la región, una aplicación circunscrita de la metodología y un número reducido de profesionales; así como, la disociación entre instituciones de investigación, los gobiernos y la industria (Gutiérrez, 2011).

Los principales impactos ambientales que se han ligado con la industria del café en el mundo son la degradación del suelo y ecosistemas acuáticos, alteración de hábitat para la fauna silvestre por el cambio de uso de suelo y afectaciones sobre la salud de los productores en los campos agrícolas; por esta causa, Clay (2004) señala la importancia de adoptar una visión de ciclo de vida para la producción del café, a fin de afrontar tales adversidades. A su vez, se ha mencionado en el trabajo de Esquivel y Jiménez (2012) la liberación de residuos con potencial tóxico capaces de perturbar ambientes naturales.

Dadas las condiciones que anteceden, se describen las etapas que componen el ciclo de vida del café (Figura 3), el cual consiste en primer término en el cultivo de los árboles de café para cosechar su cereza, seguido por su procesamiento en seco o húmedo para liberar los granos verdes de café, posteriormente la etapa de refinamiento permite homogeneizar la calidad de los granos para su venta a granel; luego, el proceso de tostado de los granos verdes permite liberar el sabor y aroma del café para continuar hacia la etapa de venta al por menor, a partir de la cual se sigue hacia la etapa de consumo, donde las prácticas y

manejo del producto dependen de cada usuario; finalmente, la etapa de disposición final consiste en la consideración de los residuos sólidos generados por el usuario (ICO, 2001).

Con referencia a lo descrito anteriormente, se hace mención a los distintos enfoques que pueden ser aplicados en la evaluación del ciclo de vida del café; algunos trabajos consideran el ciclo completo mientras que otros son enfocados solamente hacia ciertas etapas con la finalidad de establecer parámetros de sustentabilidad específicos para el caso particular de estudio (Coltro et al., 2006).

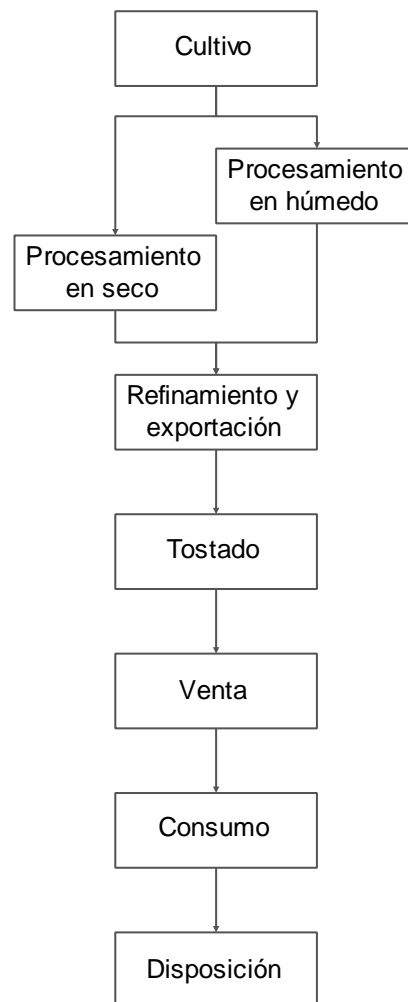


Figura 3. Ciclo de Vida del café.

Fuente: ICO (2001)

En relación con esto último, Giannetti et al. (2011) menciona en su trabajo de investigación que es necesario considerar la visión de todos aquellos actores que forman parte de cada

etapa del ciclo de vida de la industria del café para contribuir realmente en la sustentabilidad de este rubro. No obstante, las evaluaciones orientadas hacia el ACV completo de un producto se ven caracterizadas por la enorme inversión de tiempo y recursos que requieren; así como, por la complejidad del proceso para su desarrollo (Brommer et al., 2011).

Adicionalmente, en el trabajo de Salinas (2008) se puede observar que la selección de un enfoque de ciclo de vida apropiado es importante ya que logra evitar la generación de resultados basados en conjeturas, dada la poca confiabilidad de la información utilizada para el estudio. Comparativamente, en aquellos estudios donde se utilicen fuentes secundarias de información como datos base para la evaluación de los impactos ambientales, se genera incertidumbre en los resultados obtenidos del análisis (Humbert et al., 2009).

Cabe resaltar que uno de los trabajos más citados en la literatura sobre ACV en la industria del café es el de Salomone (2003), cuyo enfoque fue de cuna a tumba pero se centró en el proceso productivo de la compañía bajo estudio con el fin de identificar las mejoras potenciales para su desempeño ambiental; es conveniente mencionar que solamente los datos utilizados en la etapa de producción fueron derivados en el sitio de estudio, mientras que la información sobre los flujos de materiales y energía del resto de las etapas del ciclo de vida se originó de bases de datos comerciales y literatura existente. Si bien es cierta la importancia de considerar todas las etapas del producto, en el caso particular del café, la etapa de cultivo y procesamiento no se ha analizado adecuadamente bajo esta metodología (Bessou et al., 2013).

De modo similar, en el estudio de Büsser y Jungbluth (2009) se analizó todo el ciclo de vida del café y la información utilizada en la evaluación proviene de fuentes primarias y secundarias; asimismo, en sus resultados se observa que en la etapa de producción se generan impactos significativos al evaluar la mayoría de los indicadores de impacto ambiental. Por esta causa, es evidente que para ser capaces de mejorar el desempeño ambiental del café se deben adecuar las prácticas de consumo y sus sistemas de producción a través de una gestión ambiental efectiva (Hanssen et al., 2007).

Adicionalmente, una empresa puede aplicar la metodología de ACV con un enfoque sobre su etapa de producción para asegurar la calidad de los datos de inventario requeridos para

su análisis; así como, aplicar acciones que se encuentran bajo su control a fin de mitigar sus impactos ambientales (De Monte et al., 2005). En efecto, Salomone et al. (2013) mencionan la importancia de dicho enfoque para la gestión de la empresa, debido a la compleja naturaleza de la cadena de suministro de la industria del café.

4.3. Herramienta de ACV: Bases de datos comerciales

Las bases de datos y otras herramientas auxiliares en el desarrollo de ACV tienen como función facilitar el manejo de los datos de inventario y servir como fuente de información; además, son herramientas que tienen el potencial de ser aplicadas de manera global para distintas evaluaciones (Verghese and Lockrey, 2012).

Las bases de datos comerciales aseguran la calidad y confiabilidad de la información de inventario, y su uso en los ACV proporciona validez a los resultados obtenidos en los estudios ambientales (Weidema et al., 2013). Sin embargo, muchas de las bases de datos de mayor credibilidad y aplicación en los ACV describen procesos y sistemas europeos que pueden diferir de la realidad de otros países; aunado con la limitada cantidad de procesos incluidos en los inventarios de las bases de datos de países no europeos (Suh et al., 2013).

Una de las principales y más utilizadas bases de datos comerciales para ACV es la ecoinvent desarrollada por el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida, como resultado de una extensa compilación de inventarios para la caracterización de distintos sectores industriales (Takano et al., 2014). Actualmente, los métodos disponibles para su uso durante la fase de evaluación de impactos en ecoinvent son el CML 2001, Eco-indicator 99, ReCiPe, TRACI 2.0, IMPACT 2002+, USEtox, Ecological Footprint, entre otros (Hischier et al., 2010).

V. METODOLOGÍA

5.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo debido a que se realizó una recolección de datos relacionados con los flujos de energía y materiales de las etapas del ciclo de vida del café tostado.

5.2 Diseño metodológico

El diseño metodológico está basado en la Plataforma Europea sobre Análisis del Ciclo de Vida (EU-JRC-IES, 2010), compatible con las normas ISO 14040 y 14044, el cual consta de las fases que muestra la Figura 4:

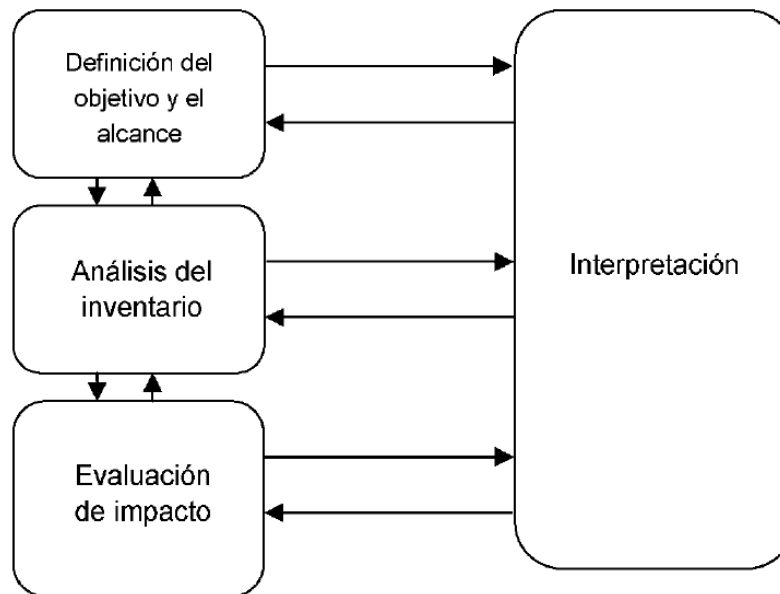


Figura 4. Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida.

Fuente: EU-JRC-IES (2010)

Fase 1. Definición de objetivo y alcance: El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular.

- Fase 2. Análisis de inventario (AI): Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio definido.
- Fase 3. Evaluación de impactos (EI): Su objetivo es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental.
- Fase 4. Interpretación de resultados: se resumen y discuten los resultados del ICV o de la EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

5.2.1 Definición del objetivo y alcance

El objetivo del presente trabajo de investigación es lograr transitar hacia patrones de producción y consumo sustentables durante el ciclo de vida del café tostado, mediante la evaluación del inventario de los flujos de energía y materiales necesarios para diagnosticar su etapa de producción bajo un enfoque de puerta a puerta a fin de evaluar las cargas ambientales asociadas a dicho proceso; al mismo tiempo, crear distintos escenarios del sistema de producción para optimizar su desempeño ambiental bajo una visión de ciclo de vida.

El presente estudio se realizó en la planta Caffenio ubicada en la ciudad de Hermosillo, Sonora durante el periodo de agosto del 2013 a diciembre del 2014. La aplicación de la metodología de ACV fue para fines exploratorios y de aprendizaje sobre el proceso de tostado de café; los resultados del análisis sirvieron como fundamento para la caracterización de su sistema de producción, la identificación de posibilidades de mejora y la selección de indicadores de desempeño ambiental.

La información proporcionada por la empresa fueron datos promedio de producción anual e información correspondiente a sus flujos de energía y materiales; además, se realizó muestreo y colecta de información propia en el sitio.

Los límites del sistema incluyen al procesamiento de la materia prima para el proceso de producción del café tostado. La UF se define en 2 300 tons de granos de café tostado empaquetado. Se excluye del sistema la producción de la maquinaria y el equipo.

El estudio es de tipo atribucional, ya que describe la situación actual de un sistema al contabilizar los flujos de energía y materiales (Plevin et al., 2014). No se incluyen dentro de los límites del sistema a las etapas de extracción de materia prima, uso y disposición final del producto debido a limitaciones para la obtención de la información requerida para el inventario. Hecha la observación anterior, en la etapa de producción se utilizó información secundaria para los materiales de empaque y la energía a partir de bases de datos comerciales del software de ACV SimaPro 8 (PRé, 2013).

Similarmente, para las emisiones al aire del proceso de tostado, se complementó la información proporcionada por la empresa con fuentes literarias.

5.2.1.1 Preguntas de investigación

- ❖ ¿Cuáles son los mayores impactos ambientales generados en el proceso de fabricación del café?
- ❖ ¿Cuáles son las etapas del ciclo de vida de la fabricación de café donde se generan mayores impactos ambientales?
- ❖ ¿Es posible la optimización de recursos a partir del Análisis del Ciclo de Vida en Caffenio?

5.2.2 Análisis de Inventario

5.2.2.1 Instrumentos de recolección y manejo de datos

Los instrumentos de recolección de datos del presente estudio están basados en los requerimientos de la Plataforma Europea sobre Análisis del Ciclo de Vida (EU-JRC-IES, 2010), compatible con las normas ISO 14040 y 14044 y consisten en hojas de datos para procesos unitarios (Tabla 1) y hoja de recopilación de datos del análisis del inventario del ciclo de vida (Tabla 2), las cuales se muestran a continuación:

Tabla 1. Hoja de datos para procesos unitarios.

Elaborado por:			Fecha:	
Identificación del proceso unitario:				
Periodo de tiempo:			Inicio:	Finalización:
Descripción del proceso unitario:				
Entradas de material	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Consumo de agua	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Entradas de energía	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Salidas de materiales (y productos)	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo	Origen
Nota: los datos en esta hoja de recopilación de datos se refieren a todas las entradas y salidas no asignadas durante el periodo especificado.				

Fuente: AENOR (2006b)

Las herramientas a utilizar para el manejo de los datos fueron las hojas de cálculo y las bases de datos comerciales del Software de ACV SimaPro 8 (PRé, 2013).

Tabla 2. Hoja de datos del análisis de inventario del ciclo de vida.

Elaborado por:			
Identificación del proceso unitario:			Lugar objeto del informe:
Emisiones al aire	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo
Vertidos al agua	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo
Vertidos al suelo	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo
Otras emisiones o vertidos	Unidades	Cantidad	Descripción de los procedimientos de muestreo
Describir cualquier cálculo, recopilación de datos, muestreo o variación de la descripción de los procesos unitarios que sea especial (adjuntar hojas adicionales si es necesario).			

Fuente: AENOR (2006b)

5.2.3 Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida

Para realizar la EICV se aplicó el método de caracterización de impactos ReCiPe 2008 Midpoint y Endpoint Hierarchist World y se evaluaron las categorías de impacto enlistadas en la Tabla 3; ReCiPe se fundamenta en los métodos EcoIndicator 99 y CML-IA, lo que representa una ventaja para mejorar la flexibilidad y uniformidad del ACV (Goedkoop et al., 2013).

Tabla 3. Categorías de Impacto.

Categoría de Impacto	Unidad
Cambio Climático	kg CO ₂ eq
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq
Acidificación Terrestre	kg SO ₂ eq
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC
Formación de Material Particulado	kg PM10 eq
Agotamiento de Combustibles Fósiles	kg petróleo eq

Fuente: Goedkoop et al. (2013)

5.3 Objeto de estudio

El objeto de estudio de este trabajo es el proceso de fabricación de granos de café tostado en la empresa Caffenio, considerando el procesamiento de la materia prima y su proceso de producción. La planta Caffenio se ubica en la ciudad de Hermosillo, Sonora donde inicia operaciones en el año 2006.

VI. RESULTADOS

6.1 Análisis del Inventario

Descripción del proceso de torrefacción del café

El sistema que se modela en este trabajo es el proceso de producción de granos de café tostado en una compañía mexicana (Figura 5), cuya primera etapa es el ALMACENAMIENTO, el cual inicia a partir de la recepción de los sacos de granos verdes de café provenientes principalmente del sur de México; en esta etapa se lleva a cabo la identificación y separación de los sacos en distintas pilas sobre bases de madera (tarimas), las cuales son identificadas y cubiertas con un plástico (polietileno de baja densidad, PEBD) para su protección.

Posteriormente, la etapa de ELEVACION consiste en hacer pasar a los granos verdes de café por una criba que permite la separación de impurezas y partículas contaminantes; una vez que la materia prima pasa por la criba mecánica, es transportada por un sistema de cablevey hacia un silo (almacenador temporal) para pasar hacia tolvas de 5 tons para su distribución hacia la siguiente etapa; el TOSTADO, el cual es un sistema de tueste por cargas donde se utiliza como combustible el gas licuado de petróleo (gas lp) para el funcionamiento de los hornos, los cuales operan a una temperatura aproximada de 260°C; esta planta cuenta con tres tambores rotatorios que tuestan los granos verdes de café con una corriente de gases calientes y en los cuales se agregan hasta 16 litros de agua suavizada durante el tueste para detener el proceso y hacer el corte del color; la duración del proceso de torrefacción es de 17 minutos aproximadamente y es realizado manualmente por los operadores.

Una vez que el café ha sido tostado, los granos son depositados en la canasta de ENFRIAMIENTO y se agregan manualmente 12 litros de agua para acelerar este proceso; la canasta de enfriamiento cuenta con una campana de extracción y una base que permite extraer los gases y el humo generados en esta etapa. Cuando los granos de café tostado han sido enfriados se transportan hacia una tolva, a partir de la cual son enviados hacia el sistema de EMPAQUETADO automatizado que permite dosificar el grano en rollos de bobina de polietileno tereftalato (PET) selladas; las bolsas finalizadas del producto son

colocadas en cajas de cartón y cubiertas con PEBD para su distribución a los centros de venta.

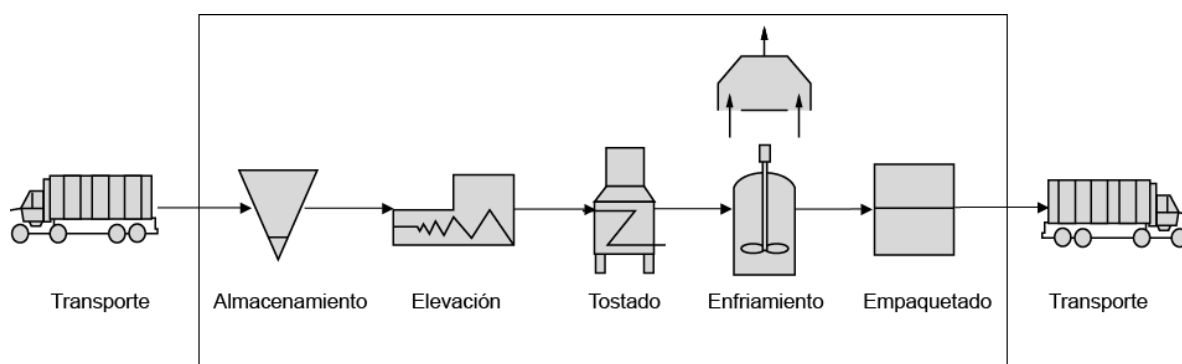


Figura 5. Proceso de torrefacción del café.

Fuente: Elaboración propia

Los datos de inventario sobre los flujos de materiales y energía se obtuvieron mediante entrevistas regulares con los operadores y supervisores de la planta para recopilar la información correspondiente a los equipos, procesos y logística, durante el periodo de referencia 2013 – 2014 para la producción anual de la UF de 2 300 tons de granos de café tostado empaquetado. La Figura 6 muestra los límites del sistema incluyendo sus flujos de entradas y salidas.

Ahora bien, en la Tabla 4 se describen los equipos utilizados en el proceso de tostado de café. Como puede observarse, los quemadores de gas lp son de baja emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) para reducir su impacto negativo a la atmósfera.

Tabla 4. Parámetros operativos de los tostadores.

Tostador	Año de instalación	Especificaciones	Capacidad (kg)
1	2012	Quemador de gas con baja emisión de NOx	290
2	2008	Quemador de gas con baja emisión de NOx	290
3	2009	Quemador de gas con baja emisión de NOx	290

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el consumo de energía eléctrica se utilizaron los criterios de la norma internacional ISO 50001 (2011) sobre gestión de la energía; así como, la información proporcionada por la empresa sobre los datos de técnicos del equipo eléctrico (Anexo 01).

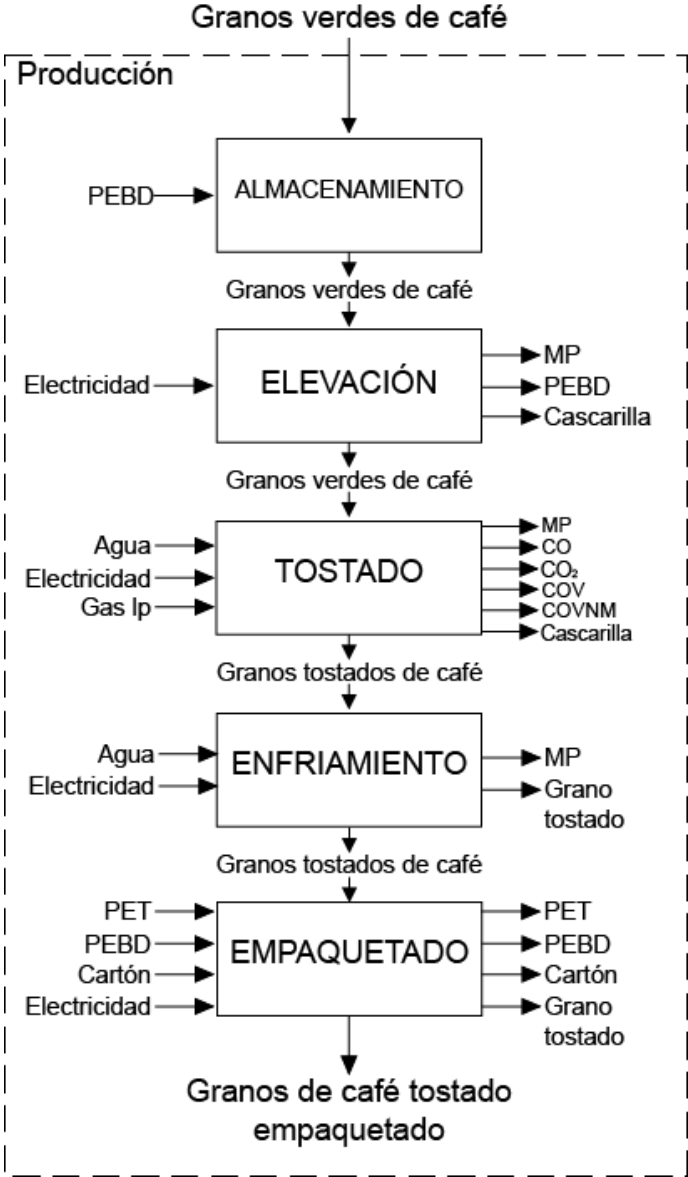


Figura 6. Límites del sistema y flujos de entradas / salidas.

Fuente: Elaboración propia

Los valores del consumo de energía son estimaciones calculadas de acuerdo a las fórmulas del Departamento de Energía de los EU (U.S.DOE) (2014); donde la potencia de un dispositivo eléctrico se estima multiplicando su consumo de corriente en amperios por el

voltaje que utiliza y se representa en la Ecuación (1), mientras que el consumo de energía en unidades de kWh por equipo eléctrico se obtuvo en base a la Ecuación (2). Cabe mencionar que la energía eléctrica utilizada por la empresa proviene directamente de la red de distribución del servicio público nacional de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

$$\text{Potencia} = \text{Voltaje} * \text{Amperios} \quad (1)$$

$$\text{Consumo}_{\text{Energía}} = (\text{Potencia} * \text{HorasUso}) / 1000 \quad (2)$$

Las estimaciones del consumo de energía eléctrica por etapa en el proceso de torrefacción del café se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Consumo de energía eléctrica por etapa.

Etapa	Consumo de energía (kWh/UF)
Elevación	51 797.54
Tostado	175 052.29
Enfriamiento	28 211.16
Empaquetado	21 836.82

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los flujos de residuos, éstos fueron medidos a través de la segregación y pesaje diario de los mismos en cada etapa del proceso. Con respecto a las emisiones al aire, se emplearon datos medidos en el sitio en conjunto con estimaciones de fuentes literarias para complementar la información de la empresa. Los factores de emisión utilizados se enlistan en la Tabla 6 y se basan en cálculos realizados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) (1972, 1995); así como, el inventario nacional de gases de efecto invernadero de México (Sheinbaum and Ozawa, 2006) los cuales consideran el equipo y tecnología del proceso.

Tabla 6. Factores de emisión para el café tostado.

Etapas	Sustancia	Factor de emisión (kg / kg de café)
Elevación	Material particulado (MP) filtrable	0.0000267 ^a
Tostado	MP Filtrable	0.0019 ^b
	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos (COVNM)	0.0006 ^c
	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) (Metano)	0.00039 ^a
Enfriamiento	MP Filtrable	0.0000127 ^a
^a EPA (1995) ^b EPA (1972) ^c Sheinbaum y Ozawa (2006)		

Fuente: Elaboración propia

Los datos sobre las emisiones al aire desde el proceso de tostado se dan por la Ecuación (3) (SEMARNAT-INECC, 2013a); donde S_1 es la sustancia de interés, FE es el factor de emisión para la sustancia S_1 y P son los granos verdes procesados en la planta para la producción de 2 300 tons de granos de café tostado.

$$\text{Emisión}[S_1] = FE * P \quad (3)$$

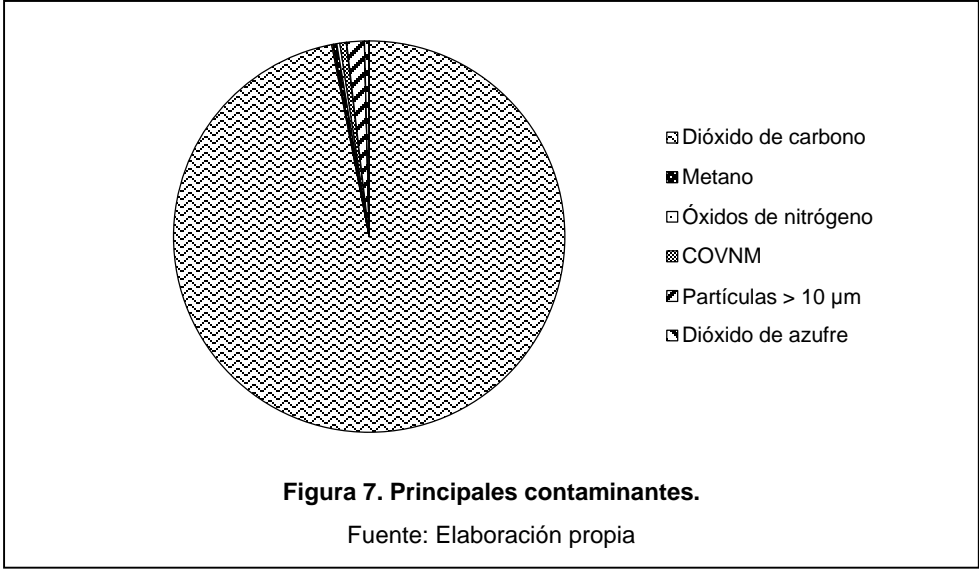
Adicionalmente, se tomaron datos de mediciones realizadas por la empresa para determinar sus flujos de emisión de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), los cuales se obtuvieron según los criterios de la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011 (2011) relativa a los niveles máximos permisibles de emisión atmosférica de los equipos de combustión. La emisión de la sustancia está dada por la Ecuación (4):

$$\text{Emisión}[S_2] = TE * \text{Horas} \quad (4)$$

Donde S_2 es la sustancia de interés, TE es la tasa de emisión de la sustancia en el proceso y Horas son las horas de operación de los tostadores para la producción de 2 300 tons de granos de café tostado.

La información correspondiente a los flujos de energía y materiales del proceso de torrefacción de café en la planta para la producción anual de 2 300 tons de café tostado empaquetado en el periodo de referencia de 2013 – 2014 en la planta Caffenio se muestran en la Tabla 7.

En lo que respecta a las emisiones al aire del sistema bajo estudio los resultados muestran que las sustancias de mayor emisión son el CO₂ (462 040.74 Kg), PM₁₀ (6 902.58 Kg) y COVNM (2 482.89 kg). En la Figura 7 se distingue el CO₂ como la principal sustancia contaminante en relación con el resto de las emisiones.



Por otro lado, las principales sustancias emitidas por etapa del proceso se muestran en la Figura 8. Se observa que las etapas de mayor emisión de contaminantes son el tostado del café y el empaquetado.

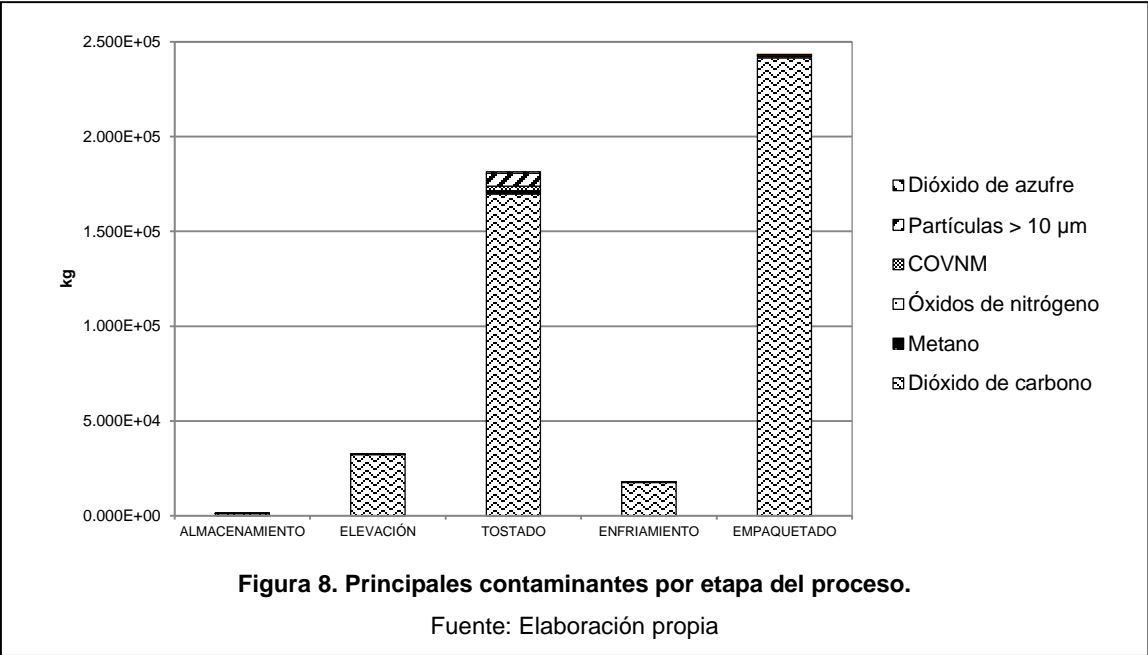


Tabla 7. ICV para la producción de 2 300 tons de café tostado empaquetado (UF).

	Flujo		Cantidad	Unidad
Entradas	Energía	Electricidad	276 897.80	kWh
		Gas lp	69 808	kg
	Materiales	Granos de café verde	3 450	tons
		Agua suavizada	483	tons
		Cartón corrugado	170	tons
		PEBD	3	tons
		PET	13	tons
Salidas	Producto	Granos de café tostado	2 300	tons
	Emisiones al aire	Acetaldehído	0.428149	kg
		Aldehídos	0.010823	kg
		Amonio	35.97	kg
		Benzaldehído	0.000032	kg
		COVNM	2 482.89	kg
		Dióxido de azufre	1 787.50	kg
		Dióxido de carbono	462 040.74	kg
		Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	0.000137	kg
		Furano	0.185871	kg
		Metano	1 347.37	kg
		Metano, triclorofluoro-, CFC-11	0.00000076	kg
		Monóxido de carbono	631.32	kg
		Monóxido de dinitrógeno	39.26	kg
		Óxidos de azufre	30.00	kg
		Óxidos de nitrógeno	1 197.17	kg
		Partículas > 2.5 µm y < 10µm	57.28	kg
		Partículas < 2.5 µm (PM _{2.5})	170.19	kg
		Partículas > 10 µm (PM ₁₀)	6 902.58	kg
	Residuos	Cascarilla	10 873.26	kg
		Granos de café tostado	314.11	kg
		Cartón corrugado	396.86	kg
		PEBD	522.43	kg
		PET	880	kg

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de salida correspondientes al proceso de tostado para el caso de estudio muestran que los principales residuos generados son la cascarilla del café con 10 873.26 Kg generados y los plásticos PEBD y PET, con un total de 522.43 Kg y 880 Kg respectivamente. Cabe mencionar, que para los residuos plásticos, la compañía ya cuenta con un sistema de segregación y colecta de materiales para su venta y envío a una empresa externa de reciclaje.

6.2 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

6.2.1 Metodología de evaluación de impactos ReCiPe 2008

Una vez obtenido el ICV se llevó a cabo la caracterización de los flujos de energía y materiales en las categorías de impacto descritas anteriormente bajo la metodología ReCiPe 2008, tanto para el enfoque midpoint como endpoint. En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos de dicha caracterización midpoint.

Tabla 8. Resultados de la EICV (ReCiPe 2008).

Categoría de Impacto	Total	Unidad
Cambio Climático	507 424.83	kg CO ₂ eq
Agotamiento de Combustibles Fósiles	106 964.75	kg petróleo eq
Formación de Material Particulado	7 768.45	kg PM10 eq
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	3 870.27	kg NMVOC
Acidificación Terrestre	2 576.05	kg SO ₂ eq
Agotamiento de Ozono	0.00001732	kg CFC-11 eq

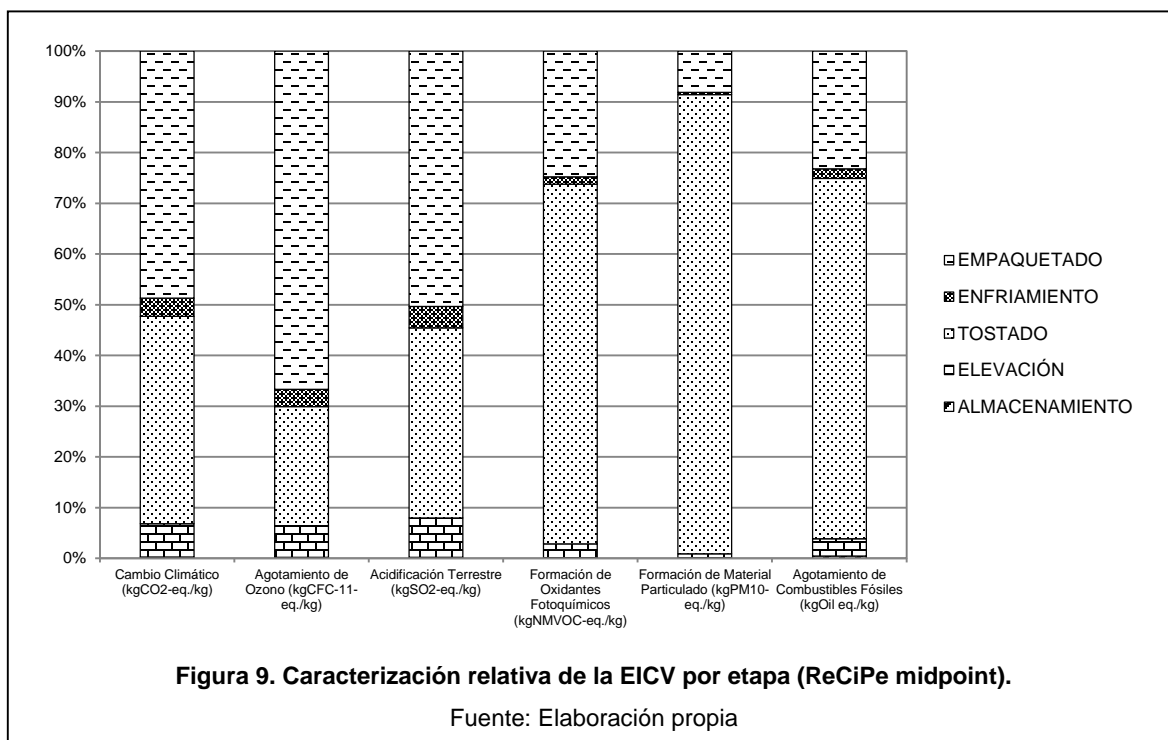
Fuente: Elaboración propia

Mientras que en la Figura 9 se presenta la caracterización relativa de la EICV por cada etapa del sistema bajo estudio para observar la contribución de cada etapa por categoría de impacto; se obtiene que las etapas de tostado y empaquetado son las de mayor aportación negativa para cada una de las categorías evaluadas.

Posteriormente, se llevó a cabo la fase de normalización de los resultados para facilitar la interpretación de los valores obtenidos en el AI con referencia al perfil ambiental del sistema económico global. Los factores de normalización establecidos para el método ReCiPe 2008

se presentan en la Tabla 9, tanto para el enfoque midpoint como endpoint con una visión jerárquica y en un contexto global.

Tal como se mencionó anteriormente, la aplicación de la metodología ReCiPe permite evaluar los impactos ambientales para categorías orientadas al problema (midpoint) como para categorías orientadas al daño (endpoint); por lo tanto, a fin de enriquecer el análisis del presente trabajo se realizó una evaluación bajo ambos enfoques. Los resultados de la evaluación endpoint de las tres Áreas de Protección se presentan en la Figura 10.



Los resultados de la normalización de la EICV (Figura 11) exhiben a la categoría de formación de material particulado como la de mayor impacto ambiental, seguida de agotamiento de combustibles fósiles, formación de oxidantes fotoquímicos, cambio climático y acidificación terrestre, cuyos valores son semejantes entre ellos.

De igual forma, se llevó a cabo la normalización de los valores bajo el enfoque endpoint para analizar las tres Áreas de Protección. La Figura 12 presenta estos resultados y se puede ver que el área de recursos naturales exhibe la mayor afectación para el sistema bajo estudio. Por su parte, las etapas que generan mayor impacto son el tostado y

empaquetado del producto; siendo este un comportamiento similar al encontrado en los resultados del enfoque midpoint.

Tabla 9. Factores de normalización ReCiPe 2008.

Enfoque	Categoría de impacto	Factor de normalización
Midpoint	Cambio Climático	4.22E+13
	Agotamiento de Ozono	2.30E+08
	Acidificación Terrestre	2.34E+11
	Formación de Oxidantes Fotoquímicos	3.00E+11
	Formación de Material Particulado	8.61E+10
	Agotamiento de Combustibles Fósiles	7.90E+12
Endpoint	Salud Humana	8.27E+07
	Salud de los Ecosistemas	5.61E+06
	Recursos Humanos	1.50E+12

Fuente: Goedkoop et al. (2013)

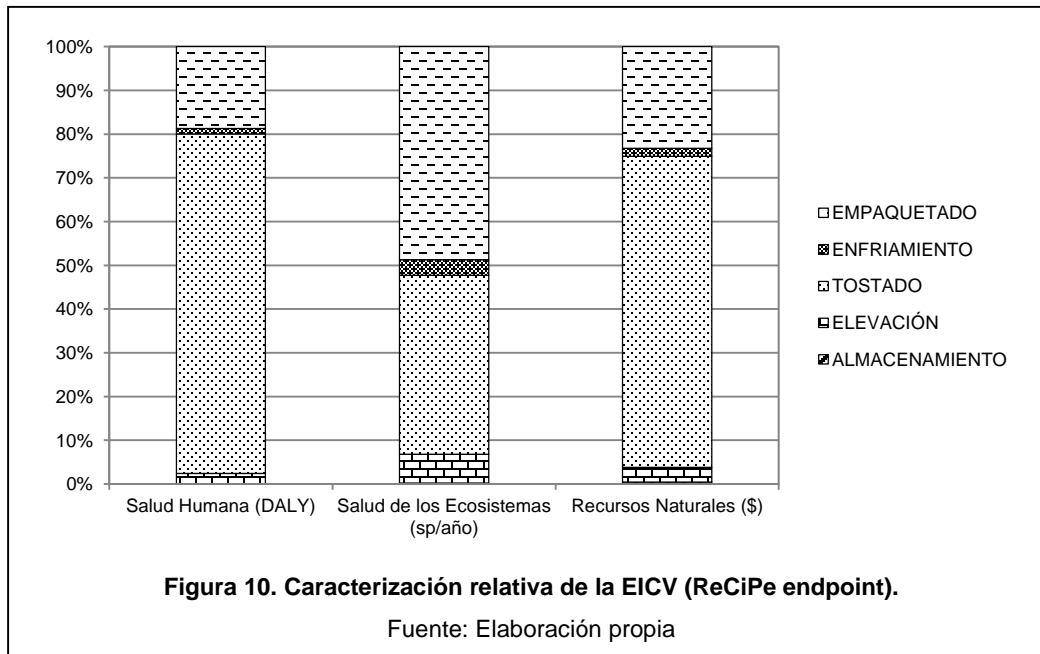
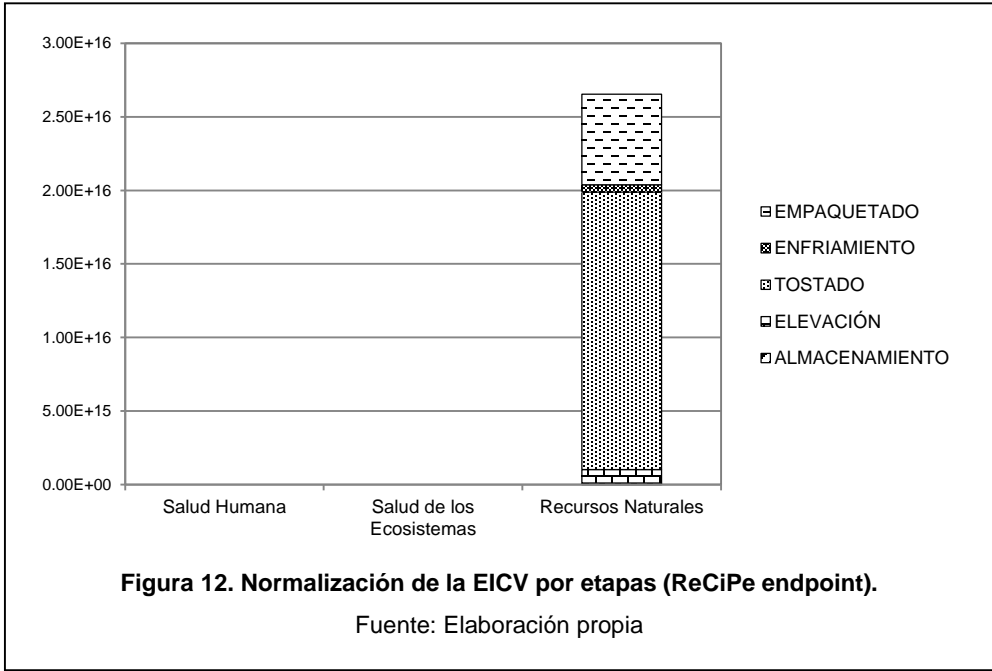
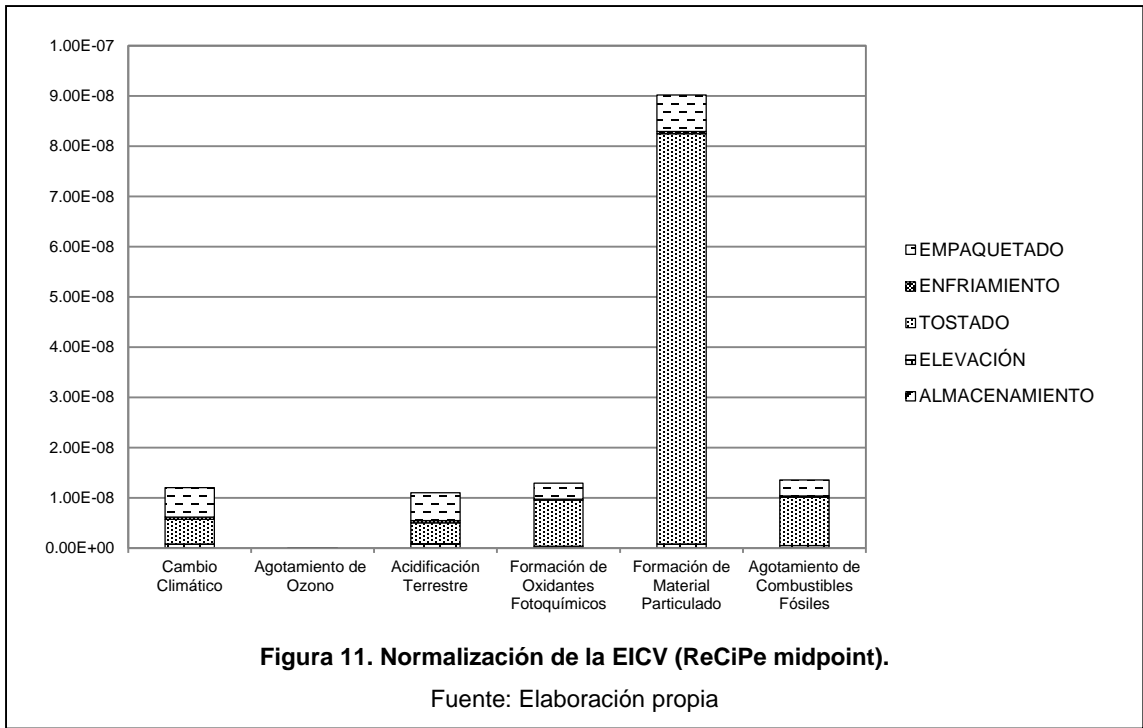


Figura 10. Caracterización relativa de la EICV (ReCiPe endpoint).

Fuente: Elaboración propia



6.2.2 Metodología de evaluación de impactos IMPACT 2002+

Con la finalidad de realizar comparaciones entre los impactos ambientales generados por el proceso de producción del café tostado de acuerdo a dos metodologías de EICV, se muestran a continuación en la Tabla 10 los resultados obtenidos de la caracterización de los impactos ambientales con la metodología IMPACT 2002+.

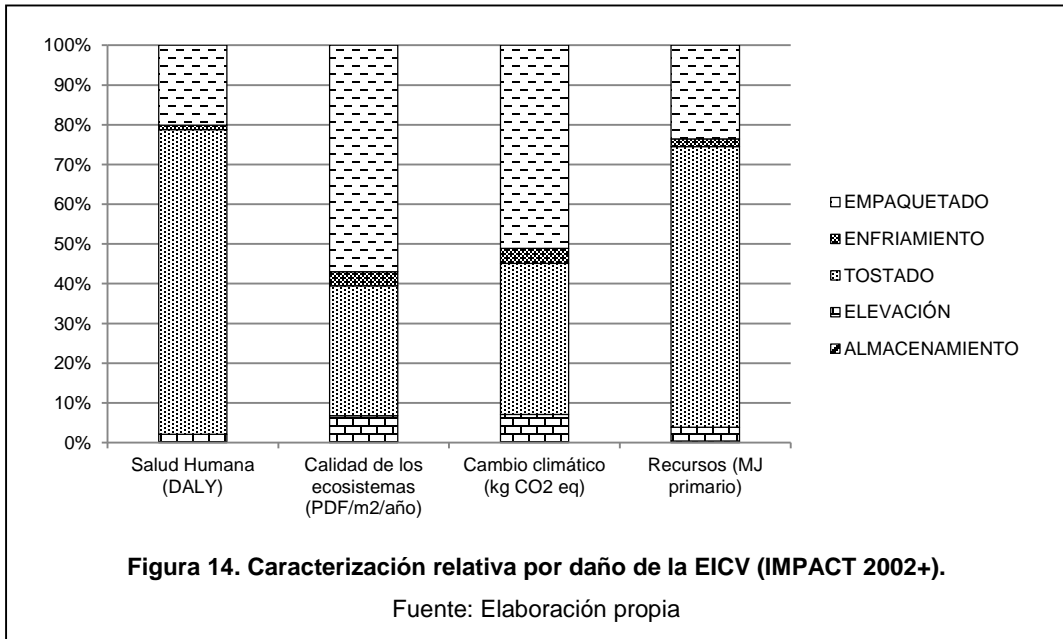
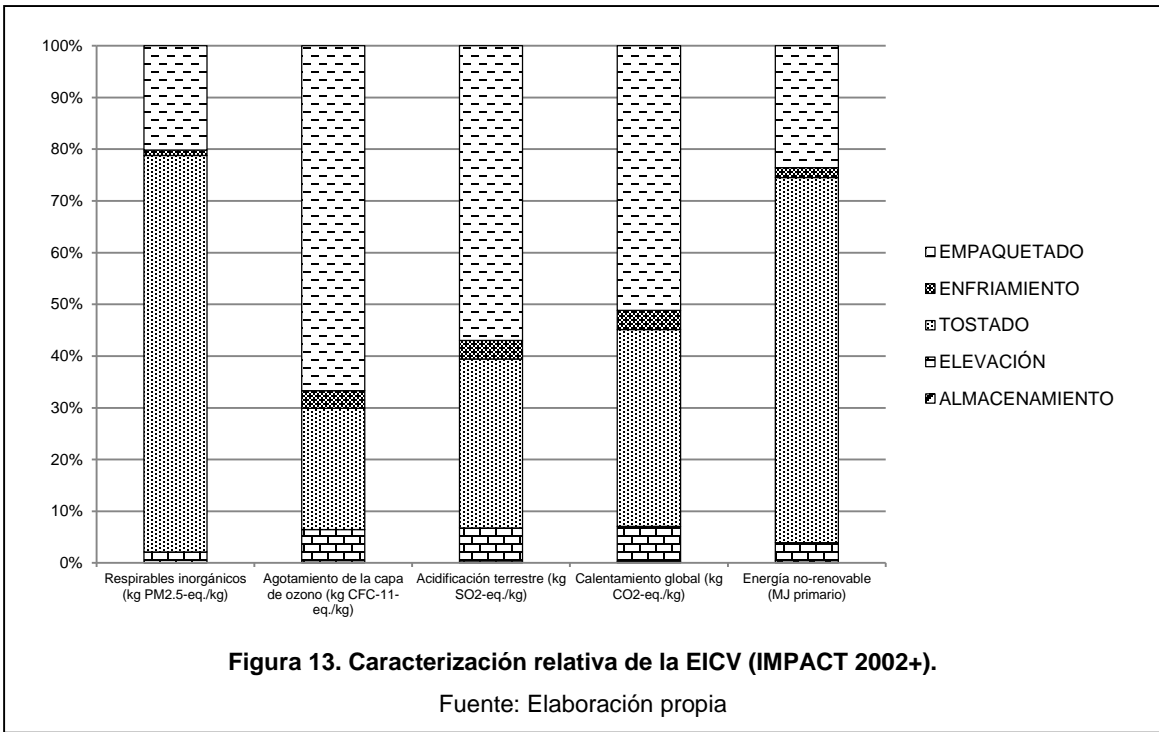
Tabla 10. Resultados de la EICV (IMPACT 2002+).

Categoría de Impacto	Total	Unidad
Energía no-renovable	4 639 953.23	MJ primario
Calentamiento global	479 396.66	Kg CO ₂ eq
Acidificación terrestre	8 895.59	Kg SO ₂ eq
Respirables inorgánicos	1 582.41	Kg PM _{2.5} eq
Agotamiento de la capa de ozono	0.00001732	Kg CFC-11 eq

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los razonamientos anteriores, resulta oportuno evaluar también la caracterización relativa de la EICV con la metodología IMPACT 2002+ (Figura 13); los resultados muestran que las dos etapas del proceso de producción de café tostado que afectan en mayor medida a cada una de las categorías de impacto son el tostado y empaquetado.

Comparativamente con ReCiPe 2008, es posible llevar a cabo una evaluación por categoría de daño del sistema bajo estudio en la metodología IMPACT 2002+. Por esta causa, a continuación se muestra la representación gráfica (Figura 14) de los impactos ambientales por daño del sistema de producción de café tostado.



VII. DISCUSIÓN

Las estimaciones del consumo de energía eléctrica en el proceso de producción de café tostado de la Tabla 5 revelan que durante la etapa de tostado se efectúa el mayor consumo de energía, causado por el uso de extractores de aire en cada uno de los tres tostadores instalados. En un estudio previo de Worrell et al. (2003) se menciona que los programas de eficiencia energética pueden proporcionar a las compañías beneficios económicos al reducir sus costos de energía y crear beneficios de productividad. No obstante, otros autores sugieren que existen barreras para la implementación de tecnologías y programas de eficiencia energética en las empresas a pesar de la existencia de investigaciones que respaldan sus beneficios potenciales (Thollander et al., 2007, Cagno et al., 2013).

Sin embargo, una gestión efectiva de energía en los procesos productivos sienta las bases para catalizar una mayor eficiencia energética en la industria manufacturera (Bunse et al., 2011). Por su parte, existen iniciativas desarrolladas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) como el manual de producción más limpia y eficiencia energética que proporciona un conjunto de herramientas para mejorar el desempeño ambiental de las industrias mediante la reducción de las emisiones dañinas, el consumo energético y de otros recursos (UNEP, 2004).

En lo que respecta a las emisiones al aire en la torrefacción del café, De Monte et al. (2003) señalan como principales sustancias al MP, CO₂, COVs, NOx, óxidos de azufre (SOx), entre otros. Entre ellas, se identifican las sustancias responsables del olor característico del café, las cuales son emitidas como gases de escape en la etapa de enfriamiento y son los acetaldehídos, piridinas, pirazinas y el ácido acético (Ranau and Steinhart, 2005).

Como se menciona en el apartado anterior, el CO₂ es uno de los principales contaminantes del tostado del café. Internacionalmente, el CO₂ es categorizado como el gas de efecto invernadero (GEI) de mayor importancia y cuya concentración debe reducirse en los procesos industriales donde es emitido (Smith et al., 2013). Consecuentemente existe un gran número de instituciones y organizaciones dedicadas a la reducción de las emisiones de GEI como estrategia para combatir el cambio climático (SEMARNAT-INECC, 2013b). Particularmente en México, la agenda nacional se fundamenta en la redacción de la Ley

General de Cambio Climático donde se establece el compromiso para reducir en un 30% las emisiones de GEI para el año 2020, y en un 50% para el año 2050 (DOF, 2012).

Ahora bien, Henriques et al. (2013) indican en su investigación que el sector industrial en México es capaz de reducir de manera indirecta sus emisiones atmosféricas a través de una participación activa en los programas voluntarios de certificación ambiental a pesar de limitaciones en la regulación de emisiones de GEI en el país. Siendo las multas potenciales por daños al ambiente el principal incentivo encontrado en la literatura para la adopción de medidas de control de la contaminación en las industrias (Di Falco, 2012).

Sin embargo, en México como en otras economías en desarrollo se observa dificultad para establecer un sistema de monitoreo continuo en las empresas responsables de emitir sustancias dañinas al ambiente debido a la falta de recursos y capacidad institucional (Escobar and Chávez, 2013). A pesar de que dichos sistemas de monitoreo continuo evitan que las empresas reporten emisiones falsas o incorrectas a los organismos certificadores (Raymond and Cason, 2011).

En el caso particular del proceso de tostado de café, la literatura muestra que la instalación de tecnologías de abatimiento pueden minimizar aún más las emisiones de MP y los gases de escape; primero, se sugiere la instalación de ciclones y filtros para la separación y colecta del MP; segundo, para las emisiones de CO y COVs la recomendación más discutida es la instalación de cámaras de postcombustión térmica o catalítica (Schmidt, 2008). Al mismo tiempo, existe la tecnología denominada de oxidación térmica regenerativa sin llama (FRTO, por sus siglas en inglés) para el tostado de café, la cual plantea una reducción de emisiones mediante la oxidación de los gases contaminantes y una disminución del consumo de energía en el tostado mediante el uso del calor de gas de escape del tostador (Lange et al., 2009).

Con referencia a los residuos sólidos, la cascarilla del café es uno de los flujos principales de salida en el sistema bajo estudio. A pesar de ello, este recurso no está siendo aprovechado por la empresa actualmente. No obstante, en los últimos años se ha presentado un incremento en investigaciones dirigidas a descubrir alternativas para el uso de la cascarilla de café y así evitar su disposición final en rellenos sanitarios o vertederos municipales. En México, la industria del café se encuentra en las primeras etapas de

desarrollo en el tema de uso de subproductos del café para la mejora de la sustentabilidad, a pesar de que existen varios estudios que apoyan su eficacia (Wong et al., 2013).

Hecha la observación anterior, en la literatura existen trabajos que indican las distintas propiedades de este residuo. Una de las propiedades más estudiadas y mencionadas de la cascarilla del café es su potencial antioxidante, lo cual puede ser explotado para beneficio de la industria química para la fabricación de suplementos alimenticios o productos de belleza (Yen et al., 2005, Napolitano et al., 2007, Costa et al., 2014). De igual manera, se ha concluido que puede tener utilidad en la industria de alimentos para la formulación de bebidas dietéticas debido a su composición química (Martinez-Saez et al., 2014). Por otra parte, otros autores sugieren que la cascarilla de café cuenta con propiedades que benefician su uso como agente bioabsorbente magnético de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (Zuorro and Lavecchia, 2013).

Un cambio de perspectiva por parte de la empresa tostadora de café que permita valorizar a este residuo como un subproducto de su proceso, permitiría la apertura de un nuevo mercado y la generación de ganancias adicionales provenientes de la venta de la cascarilla de café como materia prima para nuevos procesos. Aun así, se necesita mayor investigación sobre la viabilidad económica del uso industrial de la cascarilla de café si se pretende aplicar su gestión en el sector industrial (Narita and Inouye, 2014).

Adicionalmente, el análisis literario para este proyecto destacó la limitada disponibilidad de datos de inventario sobre emisiones y residuos del proceso de tostado de café para México; indicando la importancia de desarrollar estudios de investigación en esta área y así ampliar la base de datos nacional para los procesos industriales. De manera semejante, la región de América Latina en general se caracteriza por una escases de información correspondiente a los inventarios de flujos en sus procesos industriales; dicha situación hace énfasis en la necesidad de generar bases de datos regionales que permitan evaluar las cargas ambientales de dichos procesos con una mayor precisión y relevancia geográfica (Ossés de Eicker et al., 2010).

Ante la situación planteada y bajo las consideraciones anteriores, se llevó a cabo la evaluación de los impactos ambientales asociados con los flujos de energía y materiales de las entradas y salidas del sistema bajo estudio. El perfil de impactos caracterizados de la

producción de 2 300 tons de granos de café tostado empaquetado muestra que para los indicadores de categoría de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles se tienen valores muy elevados; similar a lo que sucede al evaluar la categoría de daño de recursos naturales.

Es preciso mencionar que los resultados de la EICV bajo el enfoque midpoint han sido clasificados como difíciles de interpretar a pesar de ser intrínsecamente más certeros que aquellos del enfoque endpoint; sin embargo, éstos últimos generan información de mayor incertidumbre pero de mayor facilidad de comprensión (Goedkoop et al., 2013). Es por ello que Dong y Ng (2014) concluyen que la aplicación de un enfoque orientado al daño debe acompañar a los resultados del enfoque orientado al problema durante la interpretación de los resultados para complementar la información resultante.

Una vez realizada la caracterización de los impactos se aplicó la fase de normalización, en la cual se obtuvieron resultados distintos en los indicadores de categoría; ya que los resultados normalizados sugieren que la categoría de mayor impacto ambiental es la formación de material particulado. Esto sucede debido a que la normalización de los resultados de los indicadores de categoría genera valores relativos al sistema económico global para ubicar a los resultados de la caracterización en un contexto ambiental más conveniente (Dahlbo et al., 2013). No obstante, Wegener et al. (2008) señalan que la carencia en información de emisiones de sustancias en los países en desarrollo limita la determinación de factores de normalización regionales y por lo tanto aumenta la incertidumbre en los datos.

En referencia a los resultados mencionados en apartados anteriores y para efectos comparativos en el proyecto, se aplicó la EICV con el método IMPACT 2002+. Una de las ventajas de realizar comparaciones en los resultados obtenidos con distintos métodos de EICV en un mismo sistema, es la posibilidad de determinar la influencia que la selección de un método puede tener en los resultados del ACV (Monteiro and Freire, 2012).

Con respecto a las etapas del proceso de producción bajo estudio, la evaluación de impacto reveló que el tostado y empaquetado del café tostado es donde se aporta en mayor medida la generación de daños al medio ambiente, tanto en ReCiPe 2008 como en IMPACT 2002+.

Adicionalmente, ambas etapas se identificaron como las principales generadoras de emisiones de CO₂ en comparación con el resto de las etapas analizadas.

En el tostado de café se utiliza como fuente de energía al gas lp y la energía eléctrica. Ésta última proviene de la red eléctrica mexicana manejada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), cuya producción proviene principalmente de combustibles fósiles (76.6% de la producción total) (SENER, 2013). Por lo cual, dicho proceso ha sido identificado como responsable de ocasionar diversos daños a la salud del medio ambiente y el ser humano por la liberación de GEI principalmente; así como, una extracción excesiva de recursos naturales no renovables (Santoyo-Castelazo et al., 2011).

Bajo tales consideraciones, una buena opción para reducir las emisiones GEI de las empresas tostadoras de café es la reducción del consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes fósiles y el cambio hacia un uso de energías renovables, con la finalidad de impactar considerablemente las afectaciones negativas derivadas del uso de electricidad en el proceso de producción (Kiwanuka, 2013).

En un artículo reciente de Alemán-Nava et al. (2014b) se hace mención al potencial energético de la biomasa como materia prima para la generación de energía renovable en México y un continuo crecimiento de la investigación en el área. Particularmente, Sonora ha sido catalogado como uno de los estados de la República Mexicana con mayor potencial bioenergético en el país, pero es necesario evaluar a profundidad su capacidad de producción de bioenergía proveniente de los residuos generados en los cultivos (Valdez-Vazquez et al., 2010).

Por otra parte, es necesario incitar el desarrollo de un sistema de gobernanza para el mercado de los bioenergéticos dada la incertidumbre de los mercados de energía; así como, posterior investigación sobre la sustentabilidad real de la generación de bioenergía para evitar amenazas potenciales (Verdonk et al., 2007). Además, se requiere llevar a cabo inventarios de biomasa nacional, fortalecer el marco legal y aplicar más acciones a favor de los bioenergéticos en México si se pretende lograr exitosamente su producción a gran escala (Alemán-Nava et al., 2014c).

El estado de Sonora, además de ser considerado como uno de los estados con mayor potencial para la generación de bioenergía, se caracteriza también por contar con gran capacidad de generación de energía solar dado a sus condiciones. Arancibia-Bulnes et al. (2014) afirman que particularmente en Hermosillo, es posible generar 7.8 kWh/m²/día de energía solar de acuerdo a sus mediciones. A pesar de ello, Luecke (2011) menciona que una de las razones por la que este recurso no ha sido aprovechado en México es la falta de apoyo del gobierno para la mitigación del cambio climático a través de un cambio hacia el uso de energías renovables.

No obstante, en el año 2012 fue expedida en México la Ley General de Cambio Climático en donde se describe el compromiso de incrementar en un 35% la generación de energías renovables en el país para el año 2024 a fin de mitigar los efectos del cambio climático (DOF, 2012). Otro instrumento legal que estimula también el uso de energías renovables en el país es la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, en donde se establece el marco legal para dicho cambio hacia los renovables (DOF, 2008). Finalmente, fue aprobada recientemente por el Congreso de la Unión en México la Reforma Energética donde se permite por primera vez la participación de actores privados en la generación de energía y se fomenta la generación de energías limpias mediante el financiamiento de proyectos y el desarrollo de capital humano en el área de los renovables (Alemán-Nava et al., 2014a).

Posteriormente, en el análisis de la etapa de empaquetado es posible observar una mayor cantidad de insumos derivados del petróleo para la elaboración de la UF. Dichos materiales de empaque se caracterizan por el uso de grandes cantidades de combustibles fósiles para su proceso de producción; en el cual, son liberadas enormes cantidades de sustancias contaminantes, principalmente GEI como el CO₂ (Akiyama et al., 2003).

El estudio de Büsser y Jungbluth (2009) sobre ACV de los empaques de café es un trabajo muy mencionado en la literatura; donde se concluye que si bien es cierto que los impactos ambientales del empaque son bajos en comparación con el resto de las etapas del ciclo de vida del café, es posible reducir tales impactos mediante la selección apropiada del tipo de empaque para el producto. Por su parte, De Monte et al. (2005) comparan el impacto ambiental del empaque de café tostado en lata con el empaque en bolsas de polilaminado

y se concluye que éstas últimas representan una mejor opción en términos de su impacto, pero no propician el reciclado de las mismas.

Es evidente bajo las consideraciones anteriores que se requiere una reevaluación de los materiales de empaque utilizados en el sistema bajo estudio. Pathak et al. (2014) hacen mención en su trabajo a los beneficios ambientales que se generan con el uso de materiales de empaque biológicos, como los bioplásticos o biopolímeros; algunos de ellos son dejar de lado la dependencia sobre el petróleo y una mejor disposición final de dichos materiales.

Cabe destacar que el mercado de los productos de empaque se caracteriza por ser un sector muy atractivo para los productores de bioplásticos debido a su enorme cobertura en la industria de los plásticos (Delgado et al., 2007). De igual manera, se espera que el mercado de los bioplásticos aumente en un 50% para el 2018 (Soroudi and Jakubowicz, 2013). A pesar de tales condiciones, en la actualidad se continua trabajando en el desarrollo de bioplásticos que puedan ser rentables para las empresas y no solo sean capaces de generar beneficios ambientales (Barker and Safford, 2009, Babu et al., 2013).

A continuación se hace mención a algunas de las medidas de mitigación para reducir los impactos ambientales negativos de las principales compañías de tostado de café a nivel internacional. Las cuales, de acuerdo al Centro de Comercio Internacional (ITC, por sus siglas en inglés) (2011) son las empresas Kraft Foods y Nestlé las que lideran el mercado del café tostado.

En la compañía Nestlé se ha adoptado una visión enfocada a incluir a toda la cadena de suministro de sus productos al igual que sus instalaciones de producción para evaluar su desempeño ambiental de forma adecuada bajo una perspectiva de ciclo de vida mientras se compromete al cambio hacia el uso de energías renovables en sus procesos; un ejemplo de ello es el uso del café residual en veintidós de sus fábricas para la generación de su energía; así como, abastecer el 85% de la electricidad en sus plantas en México a partir de energía eólica (Nestlé, 2014).

A su vez, Krafts Foods aborda el tema de sustentabilidad de su empresa mediante la adquisición de sus granos verdes de café que cuentan con certificaciones ambientales como la Rainforest Alliance, la cual asegura que las granjas productoras de café cumplan

con estándares ambientales como uso de pesticidas y erosión del suelo; asimismo, busca mejorar el desempeño ambiental en sus procesos de producción mediante la generación de energía a partir de su café residual (ERM, 2010).

Gracias a los ejemplos mencionados anteriormente, se infiere que las empresas tostadoras de café pueden aportar a la mejora de su desempeño ambiental mediante no solo la aplicación de medidas en sus procesos de producción, sino también bajo una selección apropiada de materias primas que cuenten con certificaciones que aseguren la consideración de criterios de calidad para llevar a la empresa a alcanzar la sustentabilidad de sus operaciones.

A pesar de que el presente proyecto de investigación no considera las etapas de obtención de granos verdes de café, su consumo y la disposición final del producto; cabe resaltar las prácticas favorables de la empresa Caffenio en los temas antes mencionados para contribuir en su desempeño ambiental.

Como ejemplo de ello se menciona el programa *Cosecha Calidad y Bienestar*, creado por la empresa Caffenio (2014) para mejorar las condiciones laborales de los trabajadores del campo; así como, aumentar sus capacidades mediante la oferta de cursos de capacitación a los agricultores en las fincas proveedoras del grano del sur del país. De la misma forma, México se destaca por ser uno de los países pioneros en el establecimiento de cultivos orgánicos de café a nivel mundial; así como, exportador de este producto a distintos países europeos (ITC, 2011).

7.1 Factibilidad económica de las tecnologías de abatimiento

Como se mencionó en apartados anteriores, la instalación de tecnologías de reducción de emisiones en el proceso de torrefacción del café como el sistema de oxidación térmica regenerativa asegura una eficacia elevada y permite disminuir el uso de energía debido al reuso del calor de los gases de escape (Ihobe, 2015). Asimismo, existe el sistema de oxidación catalítica, el cual utiliza temperaturas más bajas para llevar a cabo la oxidación de los contaminantes y aplica en aquellos procesos donde el contenido de compuestos orgánicos en los gases de escape son muy bajos (García, 2010).

En la Tabla 11 se describen las especificaciones de los sistemas de reducción de emisiones y sus costos estimados de adquisición específicos para el proceso de producción de la planta Caffenio.

Tabla 11. Especificaciones de las tecnologías de abatimiento.

Equipo	Tasa estimada de destrucción	Recuperación de energía térmica	Vida útil del equipo	Costo de equipo (US\$)
Oxidación Térmica Regenerativa	>98.5%	94.12%	20 años	216,066.47
Oxidación Catalítica Regenerativa	>98.5%	93.33%	20 años	237,343.64

Fuente: Glad (2015)

7.2 Factibilidad económica de la instalación de un sistema fotovoltaico (SFV)

En el análisis de las medidas de mitigación y acciones a favor de la mejora del desempeño ambiental de las empresas tostadoras de café se hizo mención a la importancia de utilizar fuentes de energía renovables para disminuir con ello el impacto negativo de la empresa por el uso de energéticos. Para ejemplificar tales consideraciones, se presentan primeramente en la Tabla 12 las especificaciones y costos de un SFV en la planta Caffenio para abastecer la generación anual de 280 805.12 kWh lo cual cubre los requerimientos de energía eléctrica del sistema bajo estudio en este proyecto.

Cabe destacar que México cuenta con un programa de incentivos denominado *Programa de Fomento a la Agricultura 2014 Componente de Bioenergía y Sustentabilidad del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO)*, a fin de apoyar a las empresas interesadas en utilizar energías renovables a través de la instalación de sistemas fotovoltaicos para su propio abastecimiento y reduciendo el costo de inversión inicial para la empresa en un 50% o hasta los \$2,000,000.00 M.N. (Tabla 12) (FIRCO, 2014).

Tabla 12. Especificaciones del SFV potencial en la planta.

Cantidad	Equipo	Costo total del equipo (\$M.N.)
586	Módulos solares	2,080,241.40
15	Estructuras de soporte	780,000.00
7	Inversor	651,000.00
15	Medios de conexión	24,000.00
60	Dispositivos de protección	33,600.00
1	Cables, cajas y tuberías	624,103.65
1	Equipos de medición de energía	49,003.06
1	Maniobras de instalación	620,400.76
1	Proyecto llave en mano	228,453.06
1	Flete, traslados y viáticos	134,853.07
	I.V.A (16%)	836,104.80
	Total sin apoyo FIRCO	6,061,759.80
	Total con apoyo FIRCO	4,061,759.80

Fuente: Pueblo_Solar (2015)

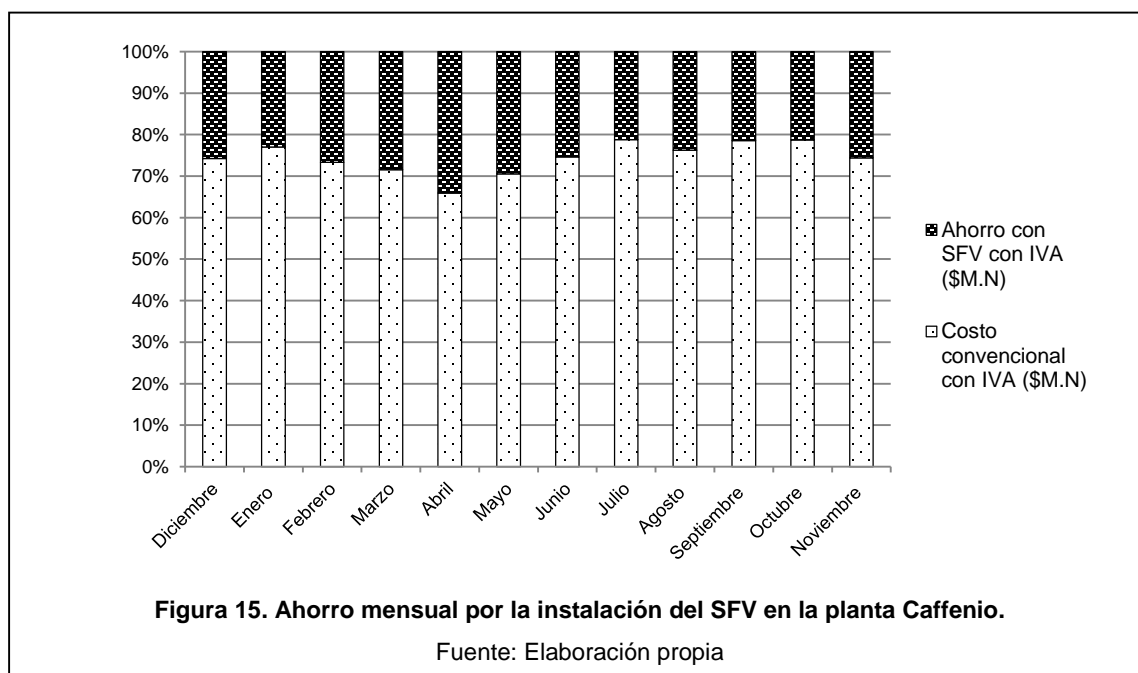
En relación con esto último, se presenta también la Tabla 13 donde se enlista la generación mensual de electricidad del SFV en comparación con el consumo mensual de toda la empresa Caffenio, al igual que sus costos asociados para el período de referencia 2014.

De igual forma, se presenta la Figura 15 para ilustrar el comportamiento del ahorro mensual por la instalación del SFV en la planta Caffenio para cubrir parcialmente la demanda de energía eléctrica; en la cual se observa que se obtiene un ahorro promedio del 30% del costo total de energía.

Tabla 13. Generación y ahorro mensual del SFV en la planta Caffenio.

Mes	Consumo en toda la empresa (kWh)	Precio medio (\$M.N/kWh)	Costo convencional con IVA (\$M.N)	Horas irradiación	Generación del SFV (kWh)	Ahorro con SFV con IVA (\$M.N)
Diciembre	56 966	1.5996	105,702.46	5.11	19 726.01	36,602.32
Enero	68 222	1.5996	126,588.38	5.27	20 343.65	37,748.37
Febrero	57 092	1.5996	105,936.26	5.96	20 780.73	38,559.39
Marzo	68 236	1.5996	126,614.35	7.02	27 099.13	50,283.41
Abril	52 430	1.5996	97,285.75	7.25	27 084.19	50,255.68
Mayo	64 512	1.5996	119,704.34	6.98	26 944.72	49,996.89
Junio	73 612	1.5996	136,589.72	6.70	25 029.53	46,443.19
Julio	85 652	1.5996	158,930.37	5.98	23 084.44	42,834.00
Agosto	72 688	1.5996	134,875.20	5.86	22 621.21	41,974.46
Septiembre	84 238	1.5996	156,306.64	6.16	23 012.22	42,700.00
Octubre	88 746	1.5996	164,671.40	6.21	23 972.31	44,481.48
Noviembre	61 418	1.5996	113,963.31	5.65	21 106.99	39,164.77
Totales	833 812		1,547,168.18		280 805.12	521,043.96

Fuente: Pueblo_Solar (2015)



6.1.1 Análisis costo - beneficio

Una vez evaluada la factibilidad técnica y económica del SFV en la planta Caffenio, se aplica el modelo matemático de la Ecuación (5) basado en un análisis de costo – beneficio para evaluar el costo real del sistema con respecto a la reducción de emisiones del GEI de interés (Zhai et al., 2014).

$$B_k^i = \frac{E_{\text{real},k}^i \times t^i \times \left[\sum_{j=1}^n (GWP^j f_{\text{grid},k}^j) - \sum_{j=1}^n (GWP^j f_i^j) \right]}{P^i (C_o^i + C_{\text{FOM}}^i + C_R^i) + E_{\text{real},k}^i \times t^i \times C_{\text{VOM}}^i} \quad (5)$$

Donde:

B_k^i = costo - beneficio del SEL i en la localidad k , en kg/\$;

$E_{\text{real},k}^i$ = electricidad real generada anualmente por el SEL i en la localidad k , en kWh/año;

t^i = vida útil del SEL i , en años;

GWP^j = Potencial de Calentamiento Global de los j th GEI;

$f_{\text{grid},k}^j$ = factor de emisión de los j th GEI del sistema local de suministro de energía en la ubicación k , en kg/kWh;

f_i^j = factor de emisión de los j th GEI del ciclo de vida del SEL i , en kg/kWh;

P^i = potencia nominal del SEL i en kW;

C_o^i = costo de construcción del SEL i , en US\$/kW;

C_{FOM}^i = costo fijo de operación y mantenimiento del SEL i , en US\$/kW;

C_R^i = costo de reciclado del SEL i , en US\$/kW;

C_{VOM}^i = costo variable de operación y mantenimiento del SEL i , en US\$/kW.

Los datos utilizados para el análisis costo – beneficio del SFV en la planta Caffenio se muestran en la Tabla 14. Cabe resaltar que el valor dado para el costo de construcción del SFV en la planta es el total sin apoyo de FIRCO.

Tabla 14. Datos representativos para el análisis costo – beneficio del SFV.

Variable	Definición	Cantidad	Unidad
$E_{real,k}^i$	Electricidad real generada por el SFV en Hermosillo	280 805.12 ^a	kWh/año
t^i	Vida útil del SFV	25 ^a	años
$f_{grid,k}^j$	Factor de emisión de GEI para México	0.594 ^b	kg CO ₂ eq/kWh
f_i^j	Factor de emisión de GEI del ciclo de vida del SFV	0.0724 ^b	kg CO ₂ eq/kWh
P^i	Potencia nominal del SFV	124.53 ^a	kW
C_0^i	Costo de construcción del SFV	3,357.04 ^a	US\$/kW
C_{FOM}^i	Costo fijo de operación y mantenimiento del SFV	11.4 ^c	US\$/kW
C_R^i	Costo de reciclado del SFV	160.55 ^b	US\$/kW
C_{VOM}^i	Costo variable de operación y mantenimiento del SFV	0.0 ^c	US\$/kW
^a Pueblo_Solar (2015) ^b Zhai et al. (2014) ^c U.S.EIA (2014)			

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al modelo matemático, los resultados del análisis de costo – beneficio del SFV en Caffenio estiman una reducción total de 8.33 tons de CO₂ emitidos a la atmósfera por cada 1,000 US\$ de inversión de costo para la generación de energía limpia.

VIII. CONCLUSIONES

Las actividades de recopilación de los datos de inventario acentuaron la carencia de información correspondiente a las emisiones del proceso de torrefacción del café en la planta Caffenio; de igual importancia se identificó la escasez de literatura relativa a las prácticas industriales del tostado de café en México.

Asimismo, las actividades de recopilación de datos de inventario hicieron posible detectar la falta de información sobre el consumo de energía en las distintas etapas del proceso de producción de café tostado.

Por otro lado, la producción de 2 300 tons de café tostado implica la emisión de GEI como CO₂ y metano durante la etapa de tostado, así como, material particulado en varias etapas del proceso de torrefacción del café. En conclusión, deben instalarse nuevas tecnologías de abatimiento más eficiente para reducir la emisión de dichas sustancias contaminantes a la atmósfera, como lo son los sistemas de oxidación térmica regenerativa u oxidación catalítica regenerativa para al mismo tiempo reducir el gasto energético del equipo.

Referente al consumo de energía se concluye que debe realizarse un cambio de fuente de energía eléctrica en el proceso de producción del café desde uno no renovable hacia un sistema de energía limpia para el autoabastecimiento en la planta y así disminuir el consumo indirecto de combustibles fósiles. De igual forma, a partir del análisis de la EICV se concluye que es técnicamente viable el establecimiento de sistemas fotovoltaicos como fuente rentable de energía limpia para los procesos productivos en la entidad, particularmente aquellas empresas ubicadas en la ciudad de Hermosillo.

Finalmente, respecto al consumo de materiales de empaque en el proceso, se concluye que es necesario explorar continuamente la disponibilidad en el mercado de bioplásticos para el empaquetado de café tostado para reducir aún más la dependencia en los flujos de materiales plásticos provenientes del petróleo.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa Caffenio para la mejora del desempeño ambiental de la planta de producción de granos de café tostado ubicada en la ciudad de Hermosillo, Sonora realizar un estudio más profundo sobre la factibilidad de instalación de un sistema de monitoreo continuo de emisiones atmosféricas para la verificación de los niveles de contaminación producidos en el sitio.

Otra implementación que se sugiere es la instalación de medidores individuales de gas lp y energía eléctrica que permitan cuantificar el consumo de energía en las distintas etapas del proceso productivo para facilitar la implementación de un programa de gestión de la energía a fin de hacer posible la eficiencia energética en la planta.

Es recomendada la adquisición e instalación de nueva tecnología de abatimiento en la etapa de tostado del café para reducir las emisiones al aire; particularmente el sistema de oxidación catalítica regenerativa dados los niveles de emisión de compuestos orgánicos volátiles del sistema bajo estudio.

Finalmente, con base en los estudios de factibilidad económica y análisis de costo – beneficio, se recomienda la instalación de un sistema fotovoltaico para el consumo de energía eléctrica del proceso de producción de granos de café tostado; de este modo contribuir a la generación de energía limpia en el país y aportar a las medidas de mitigación del cambio climático.

X. REFERENCIAS

- AENOR 2006a. ISO 14040:2006 "Principios y Marco de Referencia". *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AENOR 2006b. ISO 14044:2006 "Requisitos y Directrices". *Versión oficial, en español, de la Norma Internacional ISO 14044:2006*.: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AKIYAMA, M., TSUGE, T. & DOI, Y. 2003. Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. *Polymer Degradation and Stability*, 80, 183-194.
- ALEMÁN-NAVA, G., SANDATE-FLORES, L., MENESES-JÁCOME, A., DÍAZ-CHAVEZ, R., DALLEMAND, J. F. & PARR, R. 2014a. Bioenergy Sources and Representative Case Studies in Mexico. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 5, 5.
- ALEMÁN-NAVA, G. S., CASIANO-FLORES, V. H., CÁRDENAS-CHÁVEZ, D. L., DÍAZ-CHAVEZ, R., SCARLAT, N., MAHLKNECHT, J., DALLEMAND, J.-F. & PARRA, R. 2014b. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153.
- ALEMÁN-NAVA, G. S., MENESES-JÁCOME, A., CÁRDENAS-CHÁVEZ, D. L., DÍAZ-CHAVEZ, R., SCARLAT, N., DALLEMAND, J.-F., ORNELAS-SOTO, N., GARCÍA-ARRAZOLA, R. & PARRA, R. 2014c. Bioenergy in Mexico: Status and perspective. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- ANTÓN, M. 2012. Análisis de ciclo de vida aplicado a horticultura protegida. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)* [Online], Vol. 3.
- ARANCIBIA-BULNES, C. A., PEÓN-ANAYA, R., RIVEROS-ROSAS, D., QUIÑONES, J. J., CABANILLAS, R. E. & ESTRADA, C. A. 2014. Beam Solar Irradiation Assessment for Sonora, Mexico. *Energy Procedia*, 49, 2290-2296.
- BABU, R., O'CONNOR, K. & SEERAM, R. 2013. Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials*, 2, 8.
- BARKER, M. & SAFFORD, R. 2009. Industrial uses for crops: Markets for bioplastics. *HGCA PROJECT REPORT 450*. London: HGCA.
- BAUMANN, H. & TILLMAN, A. 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application*, Lund, Studentlitteratur AB.
- BESSOU, C., BASSET-MENS, C., TRAN, T. & BENOIST, A. 2013. LCA applied to perennial cropping systems: a review focused on the farm stage. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 340-361.
- BRATT, C., HALLSTEDT, S., ROBERT, K. H., BROMAN, G. & OLDMARK, J. 2011. Assessment of eco-labelling criteria development from a strategic sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1631-1638.
- BROMMER, E., STRATMANN, B. & QUACK, D. 2011. Environmental impacts of different methods of coffee preparation. *International Journal of Consumer Studies*, 35, 212-220.
- BUNSE, K., VODICKA, M., SCHÖNSLEBEN, P., BRÜLHART, M. & ERNST, F. O. 2011. Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19, 667-679.

- BÜSSER, S. & JUNGBLUTH, N. 2009. The role of flexible packaging in the life cycle of coffee and butter. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 80-91.
- CAFFENIO. 2014. *Responsabilidad Social* [Online]. Sonora, México: Café del Pacífico. Available: <http://www.caffenio.com/v1/doc/responsabilidad.html> [Accessed 13 enero 2015].
- CAGNO, E., WORRELL, E., TRIANNI, A. & PUGLIESE, G. 2013. A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 290-308.
- CLAY, J. 2004. *World Agriculture and the Environment: A Commodity-By-Commodity Guide To Impacts And Practices*, Washington, DC., Island Press.
- COLTRO, L., MOURAD, A., OLIVEIRA, P., BADDINI, J. & KLETECKE, R. 2006. Environmental Profile of Brazilian Green Coffee (6 pp). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 16-21.
- COSTA, A. S. G., ALVES, R. C., VINHA, A. F., BARREIRA, S. V. P., NUNES, M. A., CUNHA, L. M. & OLIVEIRA, M. B. P. P. 2014. Optimization of antioxidants extraction from coffee silverskin, a roasting by-product, having in view a sustainable process. *Industrial Crops and Products*, 53, 350-357.
- CURRAN, M. 2006. *Life Cycle Assessment: principles and practice*. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency.
- DAHLBO, H., KOSKELA, S., PIHKOLA, H., NORS, M., FEDERLEY, M. & SEPPÄLÄ, J. 2013. Comparison of different normalised LCIA results and their feasibility in communication. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 850-860.
- DE BRUIJN, H., VAN DUIN, R. & HUIJBREGTS, M. 2004. Management of LCA projects: procedures. In: GUINEE, J., GORREE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., KONING, A., OERS, L., WEGENER SLEESWIJK, A., SUH, S. & UDO DE HAES, H. (eds.) *Handbook on Life Cycle Assessment*. Springer Netherlands.
- DE MONTE, M., PADOANO, E. & POZZETTO, D. 2003. Waste heat recovery in a coffee roasting plant. *Applied Thermal Engineering*, 23, 1033-1044.
- DE MONTE, M., PADOANO, E. & POZZETTO, D. 2005. Alternative coffee packaging: an analysis from a life cycle point of view. *Journal of Food Engineering*, 66, 405-411.
- DELGADO, C., BARRUETABEÑA, L. & SALAS, O. 2007. Assessment of the environmental advantages and drawbacks of existing and emerging polymers recovery processes. Luxemburg: Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.
- DI FALCO, S. 2012. Economic Incentives for Pollution Control in Developing Countries: What Can We Learn from the Empirical Literature? *International Agricultural Policy*, 2.
- DOF 2008. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la transición energética. In: CDDHCU (ed.). México: Diario Oficial de la Nación.
- DOF 2012. Ley General de Cambio Climático. In: UNIÓN, C. D. D. H. C. D. L. (ed.). México: Diario Oficial de la Nación.
- DONG, Y. & NG, S. T. 2014. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—a study of commercial buildings in Hong Kong. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1409-1423.
- EDWARDS, S. 2009. *A new way of thinking: The Lowell Center Framework for Sustainable Products*. Lowell, MA: University of Massachusetts Lowell.
- EPA 1972. *Compilation of air pollutant emission factors (second edition)*. Second ed. North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency.

- EPA 1995. Compilation of air pollutant emission factors (fifth edition). Fifth ed. North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency.
- ERM 2010. Kraft Foods Responsibility Report. USA: Environmental Resources Management.
- ESCOBAR, N. & CHÁVEZ, C. 2013. Monitoring, firms' compliance and imposition of fines: evidence from the Federal Industrial Inspection Program in Mexico City. *Environment and Development Economics*, 18, 723-748
- M3 - 10.1017/S1355770X13000338.
- ESQUIVEL, P. & JIMÉNEZ, V. M. 2012. Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46, 488-495.
- EU-JRC-IES 2010. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First ed. Luxembourg.
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., KOEHLER, A., PENNINGTON, D. & SUH, S. 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91, 1-21.
- FIRCO. 2014. *Componente de Bioenergía y Sustentabilidad* [Online]. México, D.F.: Fideicomiso de Riesgo Compartido. Available: http://www.firco.gob.mx/componentes_2014/Paginas/Bioenergia_Sustentabilidad.aspx [Accessed 14 enero 2015].
- GARCÍA, G. 2010. *Escenarios de reducción de emisiones en el sector industrial de jurisdicción local del Distrito Federal* Maestría en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional.
- GIANNETTI, B. F., OGURA, Y., BONILLA, S. H. & ALMEIDA, C. M. V. B. 2011. Accounting emergy flows to determine the best production model of a coffee plantation. *Energy Policy*, 39, 7399-7407.
- GLAD, R. 2015. Budgetary design criteria. Hulbert, Oklahoma: American Environmental Fabrication & Supply, LLC.
- GOEDKOOP, M. J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE-SCHRYVER, A., STRUIJS, J. & VAN-ZELM, R. 2013. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First ed.
- GUINÉE, J., GORREE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., VAN-OERS, L., WEGENER-SLEESWIJK, A., SUH, S., UDODEHAES, H., DEBRUIJN, J., VANDUIN, R. & HUIJBREGTS, M. (eds.) 2004. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*, Dordrecht, Boston, New York, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.
- GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., ZAMAGNI, A., MASONI, P., BUONAMICI, R., EKVALL, T. & RYDBERG, T. 2011. Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45, 90-96.
- GUTIÉRREZ, V. 2011. Utilidad del Análisis de Ciclo de Vida en México. México: SEMARNAT-INE-DGCENICA.
- HANSEN, O., RUKKE, E.-O., SAUGEN, B., KOLSTAD, J., HAFROM, P., KROGH, L., RAADAL, H., RØNNING, A. & WIGUM, K. 2007. The environmental effectiveness of the beverage sector in Norway in a Factor 10 perspective. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 257-265.
- HEIJUNGS, R., SETTANNI, E. & GUINÉE, J. 2012. Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.

- HENRIQUES, I., HUSTED, B. W. & MONTIEL, I. 2013. Spillover Effects of Voluntary Environmental Programs on Greenhouse Gas Emissions: Lessons from Mexico. *Journal of Policy Analysis and Management* 32, 296-322.
- HISCHIER, R., WEIDEMA, B., ALTHAUS, H. J., BAUER, C., DOKA, G., DONES, R., FRISCHKNECHT, R., HELLWEG, S., HUMBERT, S., JUNGBLUTH, N., KÖLLNER, T., LOERINCIK, Y., MARGNI, M. & NEMECEK, T. 2010. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods *In: ROLAND HISCHIER, B. W. (ed.) ecoinvent report No. 3, v2.2.* Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories
- HUMBERT, S., LOERINCIK, Y., ROSSI, V., MARGNI, M. & JOLLIET, O. 2009. Life cycle assessment of spray dried soluble coffee and comparison with alternatives (drip filter and capsule espresso). *Journal of Cleaner Production*, 17, 1351-1358.
- HUPPES, G., OERS, L., PRETATO, U. & PENNINGTON, D. 2012. Weighting environmental effects: Analytic survey with operational evaluation methods and a meta-method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 876-891.
- ICO 2001. Environmental issues relating to the coffee chain within a context of trade liberalization, through a life-cycle approach. London: International Coffee Organization.
- ICO 2013. Outlook for the World Coffee Market. Belo Horizonte, Brasil: International Coffee Organization.
- IHOBE 2015. Oxidación térmica regenerativa. *In: VASCO, D. D. M. A. Y. P. T. D. G. (ed.)*. Bilbao: Gobierno Vasco.
- INEGI 2013. El sector alimentario en México 2013. *Serie estadísticas sectoriales*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- ISO 2011. ISO 50001 Energy management systems – Requirements with guidance for use. *International Organization for Standardization*. Geneva.
- ITC 2011. The Coffee Exporter's Guide. 3rd ed. Geneva, Switzerland: International Trade Centre.
- JACQUEMIN, L., PONTALIER, P.-Y. & SABLAYROLLES, C. 2012. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 1028-1041.
- KIWANUKA, R. 2013. *Essays on global coffee supply chains: Improving Small-Scale Producers' Income*. Doctor of Philosophy, Rutgers, The State University of New Jersey.
- KLÖPFFER, W. & RENNER, I. 2009. Life-Cycle Based Sustainability Assessment of Products. *In: SCHALTEGGER, S., BENNETT, M., BURRITT, R. & JASCH, C. (eds.) Environmental Management Accounting for Cleaner Production*. Springer Netherlands.
- LANGE, S., JANSEN, G. A. & MOELLER-WILLENBERG, U. 2009. Roasting device for vegetable bulk material and method for operating a roasting device for vegetable bulk material. Google Patents.
- LOURENCO, M. S., COSTA, S. R. R., NUNEZ, R. L., XAVIER, L. S. & PEIXOTO, J. A. A. 2013. *Environmental management and use of the water in Food Service Segment: The Life Cycle Assessment as a tool for a sustainable development*, Taylor & Francis.
- LUECKE, A. 2011. Renewable energy best practices in promotion and use for Latin America and the Caribbean *Fifth Americas Competitiveness Forum for the Inter American Development Bank and Compete Caribbean* Dominican Republic: Inter-American Development Bank
- MARTINEZ-SAEZ, N., ULLATE, M., MARTIN-CABREJAS, M. A., MARTORELL, P., GENOVÉS, S., RAMON, D. & DEL CASTILLO, M. D. 2014. A novel antioxidant beverage for body weight control based on coffee silverskin. *Food Chemistry*, 150, 227-234.

- MONTEIRO, H. & FREIRE, F. 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy and Buildings*, 47, 572-583.
- MUSSATTO, S., MACHADO, E. S., MARTINS, S. & TEIXEIRA, J. 2011. Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 661-672.
- NAPOLITANO, A., FOGLIANO, V., TAFURI, A. & RITIENI, A. 2007. Natural occurrence of ochratoxin A and antioxidant activities of green and roasted coffees and corresponding byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 10499-504.
- NARITA, Y. & INOUE, K. 2014. Review on utilization and composition of coffee silverskin. *Food Research International*, 61, 16-22.
- NESTLÉ 2014. Nestlé in society - Creating shared value and meeting our commitments 2013. Switzerland.
- NIKBAKHS, E. 2009. Green Supply Chain Management. In: ZANJIRANI FARAHANI, R., ASGARI, N. & DAVARZANI, H. (eds.) *Supply Chain and Logistics in National, International and Governmental Environment*. Physica-Verlag HD.
- NOM 2011. NOM-085-SEMARNAT-2011. *Contaminación Atmosférica: Niveles Máximos Permisibles de Emisión de los Equipos de Combustión de Calentamiento Indirecto y su Medición*.
- OSSÉS DE EICKER, M., HISCHIER, R., KULAY, L. A., LEHMANN, M., ZAH, R. & HURNI, H. 2010. The applicability of non-local LCI data for LCA. *Environmental Impact Assessment Review*, 30, 192-199.
- PATHAK, S., SNEHA, C. L. R. & MATHEW, B. B. 2014. Bioplastics: Its Timeline Based Scenario & Challenges. *Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry*, 2, 84-90.
- PLEVIN, R. J., DELUCCHI, M. A. & CREUTZIG, F. 2014. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. *Journal of Industrial Ecology*, 18, 73-83.
- PRÉ. 2013. *SimaPro 8* [Online]. Amersfoort, Netherlands Available: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>.
- PUEBLO_SOLAR 2015. Estudio técnico - económico: proyecto de generación de energía eléctrica con sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica de CFE en TARIFA HM. *Estudio energético*. Hermosillo, Sonora: Energía Pueblo Solar S.A. de C.V.
- RANAU, R. & STEINHART, H. 2005. Identification and evaluation of volatile odor-active pollutants from different odor emission sources in the food industry. *European Food Research and Technology*, 220, 226-231.
- RAYMOND, L. & CASON, T. N. 2011. Can Affirmative Motivations Improve Compliance in Emissions Trading Programs? *Policy Studies Journal*, 39, 659-678.
- ROSS, S., EVANS, D. & WEBBER, M. 2002. How LCA studies deal with uncertainty. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7, 47-52.
- SALINAS, B. 2008. Life Cycle Assessment of Coffee Production. Available: http://luminairecoffee.com/img/lca_paper.pdf [Accessed September 13 2013].
- SALOMONE, R. 2003. Life cycle assessment applied to coffee production: Investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, Vol. 1, 295-300.
- SALOMONE, R., IOPPOLO, G. & SAIJA, G. 2013. The Implementation of Product-Oriented Environmental Management Systems in Agri-Food SMEs *Product-Oriented Environmental Management Systems (POEMS)*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science+Business Media.
- SANTOYO-CASTELAZO, E., GUJBA, H. & AZAPAGIC, A. 2011. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36, 1488-1499.

- SCHMIDT, K. 2008. Mitigating the Environmental Impact of Coffee Roasting. NCA Convention: National Coffee Association of U.S.A., Inc.
- SEMARNAT-INECC 2013a. Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
- SEMARNAT-INECC 2013b. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990 - 2010. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- SENER 2013. Prospectiva del sector eléctrico 2013-2027. México: Secretaría de Energía.
- SHEINBAUM, C. & OZAWA, L. 2006. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- SMITH, K. R., DESAI, M. A., ROGERS, J. V. & HOUGHTON, R. A. 2013. Joint CO₂ and CH₄ accountability for global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, E2865-E2874.
- SOROUDI, A. & JAKUBOWICZ, I. 2013. Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review. *European Polymer Journal*, 49, 2839-2858.
- SUH, S., LEIGHTON, M., TOMAR, S. & CHEN, C. 2013. Interoperability between ecoinvent ver. 3 and US LCI database: a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-9.
- SWARR, T. 2009. Societal life cycle assessment—could you repeat the question? *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 285-289.
- TAKANO, A., WINTER, S., HUGHES, M. & LINKOSALMI, L. 2014. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment* 79, 20-30.
- THOLLANDER, P., DANESTIG, M. & ROHDIN, P. 2007. Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. *Energy Policy*, 35, 5774-5783.
- THORN, M. J., KRAUS, J. L. & PARKER, D. R. 2011. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: Strengths, weaknesses, and other considerations. *Environmental Quality Management*, 20, 1-10.
- U.S.DOE. 2014. *Estimating appliance and home electronic energy use* [Online]. U.S. Department of Energy. Available: <http://energy.gov/energysaver/articles/estimating-appliance-and-home-electronic-energy-use> [Accessed September 29 2014].
- U.S.EIA 2014. Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook 2014 *Annual Energy Outlook 2014* Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration.
- UNEP 2004. Guidelines for the Integration of Cleaner Production and Energy Efficiency. United Kingdom: United Nations Environment Programme.
- VALDEZ-VAZQUEZ, I., ACEVEDO-BENÍTEZ, J. A. & HERNÁNDEZ-SANTIAGO, C. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14, 2147-2153.
- VERDONK, M., DIEPERINK, C. & FAAIJ, A. P. C. 2007. Governance of the emerging bio-energy markets. *Energy Policy*, 35, 3909-3924.
- VERGHESE, K., LEWIS, H. & FITZPATRICK, L. 2012a. Developing the Strategy. *Packaging for Sustainability*. Springer London.
- VERGHESE, K., LEWIS, H., FITZPATRICK, L. & CARRE, A. 2012b. Applying Life Cycle Assessment. *Packaging for Sustainability*. Springer London.
- VERGHESE, K. & LOCKREY, S. 2012. Selecting and Applying Tools. In: VERGHESE, K., LEWIS, H. & FITZPATRICK, L. (eds.) *Packaging for Sustainability*. Springer London.

- VIERE, T., ENDEN, J. & SCHALTEGGER, S. 2011. Life Cycle and Supply Chain Information in Environmental Management Accounting: A Coffee Case Study. *In: BURRITT, R., SCHALTEGGER, S., BENNETT, M., POHJOLA, T. & CSUTORA, M. (eds.) Environmental Management Accounting and Supply Chain Management.* Springer Netherlands.
- WEGENER, A., VAN OERS, L., GUINÉE, J., STRUIJS, J. & HUIJBREGTS, M. 2008. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of the Total Environment*, 390, 227-240.
- WEIDEMA, B. P., BAUER, C., HISCHIER, R., MUTEL, C., NEMECEK, T., REINHARD, J., VADENBO, C. O. & WERNET, G. 2013. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. *ecoinvent report No. 1(v3)*. St. Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories
- WONG, J., GUYOT, S., RODRÍGUEZ, R., GUTIÉRREZ, G., CONTRERAS, J., SAUCEDO, G. & AGUILAR, C. 2013. Alternativas actuales para el manejo sustentable de los residuos de la industria del café en México *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. Coahuila, México: Acta Química Mexicana.
- WORRELL, E., LAITNER, J. A., RUTH, M. & FINMAN, H. 2003. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. *Energy*, 28, 1081-1098.
- YEN, W. J., WANG, B. S., CHANG, L. W. & DUH, P. D. 2005. Antioxidant properties of roasted coffee residues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 2658-63.
- ZAMAGNI, A. 2012. Life cycle sustainability assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 373-376.
- ZHAI, Q., CAO, H., ZHAO, X. & YUAN, C. 2014. Assessing application potential of clean energy supply for greenhouse gas emission mitigation: a case study on General Motors global manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 75, 11-19.
- ZUORRO, A. & LAVECCHIA, R. 2013. Preparation and Characterization of Magnetically Responsive Biosorbents from Coffee Industry Residues. *Applied Mechanics and Materials*, 394, 3-7.

ANEXO 01

Datos técnicos del equipo eléctrico

Etapa	Equipo	Voltaje	Amperes
Almacenamiento			
Elevación			
Tostado			
Enfriamiento			
Empaquetado			