

**Análisis de ciclo de vida del proceso de beneficio ecológico del café (BECOLSUB) en el  
departamento de Santander**

**Rocio Yaneth Garzón Martínez**

**Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental**

**Director.**

**Alexander Meneses Jácome.**

**Ph.D en Ingeniería de Sistemas Energéticos**

**Codirector.**

**Humberto Escalante Hernández**

**Doctorado en Ingeniería Química**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Maestría en Ingeniería Ambiental**

**Bucaramanga**

**2020**

### **Dedicatoria**

El logro de esta meta quiero dedicársela a mi familia y a mi esposo

Oscar, por el apoyo incondicional y fortaleza en todo momento.

### **Agradecimientos**

Quiero dar gracias a Dios por darme la oportunidad cada día de ser mejor persona y profesional. Agradezco al Doctor Alexander Meneses Jacome por su asesoría, acompañamiento, paciencia, apoyo y dedicación para el desarrollo del trabajo de grado. Agradezco al Doctor Humberto Escalante por sus valiosos aportes y sugerencias. Finalmente agradezco a mi familia, esposo, amigos, compañeros de trabajo y estudio por sus constantes palabras de ánimo para culminar mi proyecto.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Justificación .....	20
2. Objetivos .....	22
2.1 Objetivo General .....	22
2.2 Objetivos Específicos.....	22
3. Marco Conceptual .....	23
3.1 Proceso de beneficio del café.....	23
3.1.1 Beneficio ecológico del café (BECOLSUB). .....	25
3.2. Secado Mecánico (SILO).....	26
3.3 Problemáticas ambientales conexas al beneficio del café.....	27
3.3.1 Tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. ....	28
3.3.2 Producción de biogás a partir del SMTA.....	30
4. Estado del arte: aplicaciones del acv en el sector caficultor.....	31
5. Aplicación de la metodología “ACV”: aspectos generales.....	34
5.1 Definición del objetivo y alcance .....	34
5.1.1 Enfoque ACV.....	35
5.1.2 Fronteras del sistema.....	36
5.1.3 Función y unidad funcional. ....	39

5.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV).....	39
5.2.1 Descripción de flujos elementales y económicos por escenario.....	40
5.2.2 Reglas de inclusión y exclusión.....	40
4.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) .....	42
5.4 Interpretación del estudio.....	43
6. Resultados.....	44
6.1 Análisis de inventario .....	44
6.1.1 Escenario línea base (vertimiento sin tratamiento).....	44
6.1.2 Escenario alternativo (STMA sin recobro de biogás).....	47
6.1.3 Escenario de sustitución (con SMTA y recobro de biogás).....	50
6.1.4 Inventario del secado de café en silo. ....	53
6.1.5 Árboles de proceso.....	55
6.2 Análisis de impacto ambiental potencial .....	55
6.2.1 Análisis de caracterización.....	56
6.3. Análisis de contribución .....	57
6.3.1 Potencial de acidificación.....	57
6.3.2 Potencial de eutrofización.....	59
6.3.3 Poder de calentamiento global.....	60
6.3.4 Categoría respiratorios inorgánicos.....	62
6.3.5 Uso de energía no renovable.....	63
8. Interpretación y conclusiones del ACV .....	64
9. Recomendaciones.....	67
Referencias Bibliográficas .....	69

---

Apéndices..... 73

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Proceso Productivo del café. ....	25
Figura 2. Esquema y dimensionamiento típico de un SMTA 300. ....	30
Figura 3. Resumen de los escenarios de ciclo de vida considerados en el presente estudio .....	36
Figura 4. Etapas de ciclo de vida consideradas en el Escenario de Línea Base .....	37
Figura 5. Etapas de Ciclo de vida consideradas en el Escenario “Alternativo” .....	38
Figura 6. Etapas de Ciclo de vida consideradas en el Escenario de “Substitución” .....	38
Figura 7. Principales flujos elementales y económicos del escenario de línea base.....	40
Figura 8. Principales flujos elementales y económicos del escenario alternativo. ....	41
Figura 9. Principales flujos elementales y económicos del escenario de sustitución. ....	41
Figura 10. Balance de masa del escenario de línea base (referenciado a 1 kg cps).....	45
Figura 11. Balance de masa del escenario alternativo (referenciado a 1 kg cps) .....	49
Figura 12. Representación del Balance de DQO en el SMTA .....	50
Figura 13. Balance de masa del escenario de “substitución” (referenciado a 1 kg cps).....	51
Figura 14. Análisis de caracterización comparativo para los tres escenarios ACV estudiados....	56
Figura 15. Análisis de contribución por procesos al Potencial de Acidificación (kg SO <sub>2</sub> -eq/kg cps) (CML2001).....	58
Figura 16. Análisis de contribución por carga contaminante al Potencial de Acidificación (kg SO <sub>2</sub> -eq/kg cps) (CML2001) .....	58

Figura 17. Análisis de contribución por procesos al Potencial de Eutrofización (kg. PO4-eq/kg cps) (CML2001).....	59
Figura 18. Análisis de contribución por carga contaminante al Potencial de Eutrofización (kg. PO4-eq/kg cps) (CML2001). .....	60
Figura 19. Análisis de contribución por procesos al Poder de Calentamiento Global kg. CO2-eq/kg cps (IPCC100a).....	61
Figura 20. Análisis de contribución por contaminantes al Poder de Calentamiento Global kg. CO2-eq/kg cps (IPCC100a).....	62
Figura 21. Análisis de contribución por procesos a la categoría de impacto Respiratorios Inorgánicos(kg PM <sub>2.5</sub> eq /kg cps) (Impact 2002+).....	63
Figura 22. Análisis de contribución por carga contaminante a la categoría de impacto Respiratorios Inorgánicos(kg PM <sub>2.5</sub> eq /kg cps) (Impact 2002+).....	63
Figura 23. Análisis de contribución por procesos a la categoría de impacto Uso de Energía no Renovable (MJ/kg cps) (Impact2002+) .....	64

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
<i>Tabla 1. Poder calorífico de combustibles utilizados en el secado del café .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Resumen de la normativa de vertimiento aplicable al beneficio del café .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Consumo de Biogás en algunas aplicaciones en contextos rurales .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Reglas de inclusión en el proceso de Beneficio del café .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5. Métodos y categorías de impacto sugeridos para ACV de sistemas de tratamiento de aguas residuales agro-industriales con recobro de energía .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6. Caracterización fisicoquímica del efluente crudo del proceso de beneficio húmedo del café.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 7. Relación masa/unidad funcional para las cargas contaminantes en el efluente crudo del proceso beneficio húmedo del café.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del efluente del proceso de beneficio húmedo del café a salida del SMTA (Matuk et al., 1997).....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 9. Relación masa/unidad funcional para las cargas contaminantes del efluente del proceso de beneficio húmedo del café con tratamiento en el SMTA .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 10. Comparación de la calidad del efluente del proceso de beneficio del café con y sin SMTA.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 11. Comparación de la calidad del efluente del proceso de beneficio del café con y sin SMTA, en relación masa/unidad funcional.....</i>	<i>53</i>

---

*Tabla 12. Emisiones de GLP/1 kg cps (Fuente: Propia)..... 54*

*Tabla 13. Emisiones de GLP y biogás para secar 1 kg de cps, en el escenario de sustitución. 55*

*Tabla 14. Inventario de emisiones para los tres escenarios ACV considerados..... 57*

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A.. Proceso de beneficio ecológico convencional y proceso de beneficio ecológico con manejo de subproductos.....	73
Apéndice B. Capacidad desmucilaginosos y silos de café.....	74
Apéndice C. Componentes del sistema modular de tratamiento anaerobio sMTA.....	76
Apéndice D. Inventario proceso BECOLSUB.....	83
Apéndice E. Inventario proceso secado de café.....	85
Apéndice F. Inventario proceso de tratamiento de aguas residuales.....	88
Apéndice G. Composición de la pulpa de café.....	89
Apéndice H. Árbol de ciclo de vida del escenario línea base. Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq.) método CML.....	91
Apéndice I. Sustancias por categoría de impacto.....	94

**Lista de abreviaturas**

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

ALK: Alcalinidad Total

BECOLSUB: Beneficio Ecológico con Manejo de Subproductos.

C/N: Relación carbono - nitrógeno

Ca: Calcio

CENICAFÉ: Centro de Investigaciones del Café

CPS: Café Pergamino Seco.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

GLP: Gas licuado de petróleo.

MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

N-NH<sub>4</sub>: Nitrógeno Amoniacal

N-Total: Nitrógeno Total

PBHC: Proceso de Beneficio por vía Húmeda del café.

pH: concentración de iones de hidrógeno

RHA: Reactor Hidrolítico-Acidogénico.

RM: Reactor Metanogénico

SMTA: Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio.

SST: Sólidos Suspendidos Totales

TKM: Tonelada-kilómetro

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

## Resumen

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ (BECOLSUB) EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER\*.

**AUTOR:** Rocio Yaneth Garzón Martínez \*\*

**PALBRAS CLAVES:** Análisis de ciclo de vida, categoría de impacto ambiental, energía renovable, tratamiento de aguas residuales, Beneficio Ecológico del café con manejo de subproductos (Becolsub), Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), biogás.

### DESCRIPCIÓN:

El presente estudio consistió en la evaluación del Impacto Ambiental Potencial del proceso de Beneficio Ecológico del café, BECOLSUB, con la herramienta metodológica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en tres escenarios distintos, basados en un flujo de referencia relativo a las aguas residuales generadas para obtener 1 kg de café pergamino seco (c.p.s). En el estudio se busco comparar la sensibilidad de los resultados en el (i) escenario línea base (vertimiento sin tratamiento, de las aguas residuales del proceso de beneficio del café), (ii) escenario alternativo (vertimiento con tratamiento sin recobro de biogás) (iii) escenario de substitución (vertimiento con tratamiento y con recobro de biogás), para evaluar la posible ganancia ambiental del enfoque consecuencial de la recolección - valoración-aprovechamiento energético del biogás derivado del tratamiento aguas residuales con la operación del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), para ser usado en el proceso del secado del café desplazando el uso del gas propano (GLP) y la ganancia ambiental por el uso del pulpa de café como abono orgánico que remplaza el uso de fertilizantes sintéticos como la urea.

Los resultados del estudio revelan que el proceso de secado en el silo de café genera el mayor impacto ambiental seguido por el proceso de vertimiento. La comparación de los tres escenarios muestra que en el escenario de substitución se puede desplazar hasta en un 37% el uso GLP en el silo para el secado del café y ser remplazado por el biogás producido en el SMTA, reduciendo los impactos ambientales en las cinco categorías evaluadas Potencial de Acidificación (AP), Potencial de Eutrofización (EP), Respirables Inorgánicos (RESPI), Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP) y uso de energía no renovable (NRE), siendo una oportunidad para los caficultores en el aprovechamiento de los residuos del proceso de beneficio del café y la disminución de los impactos ambientales potenciales.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Ambiental, Director: Alexander Meneses Jácome. Codirector: Humberto Escalante Hernández

## Abstract

**TITLE:** LIFE CYCLE ANALYSIS OF THE CAFÉ ECOLOGICAL BENEFIT PROCESS (BECOLSUB) IN THE SANTANDER DEPARTMENT\*.

**AUTHOR:** Rocio Yaneth Garzón Martínez\*\*

**KEY WORDS:** Life cycle analysis, environmental impact category, renewable energy, wastewater treatment, Ecological Benefit of coffee with by-product management (Becolsub), Modular Anaerobic Treatment System (SMTA), biogas.

### DESCRIPTION:

The present study consisted of the evaluation of the Potential Environmental Impact of the process of Ecological Benefit of coffee, BECOLSUB, with the methodological tool of Life Cycle Analysis (LCA) in three different scenarios, based on a reference flow related to wastewater generated to obtain 1 kg of dry parchment coffee (cps). The study sought to compare the sensitivity of the results in the (i) baseline scenario (discharge without treatment of wastewater from the coffee benefit process), (ii) alternative scenario (discharge with treatment without biogas recovery) (iii) substitution scenario (dumping with treatment and with biogas recovery), to evaluate the possible environmental gain of the consequent approach to the collection - energy valuation-use of biogas derived from wastewater treatment with the operation of the Modular Anaerobic Treatment System (SMTA), to be used in the coffee drying process by displacing the use of propane gas (LPG) and the environmental gain from the use of coffee pulp as an organic fertilizer that replaces the use of synthetic fertilizers such as urea.

The results of the study reveal that the drying process in the coffee silo generates the greatest environmental impact followed by the pouring process. The comparison of the three scenarios shows that in the substitution scenario the use of LPG in the silo for drying coffee can be displaced by up to 37% and replaced by the biogas produced in the SMTA, reducing the environmental impacts in the five categories evaluated Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), Inorganic Breathable (RESPI), 100-Year Global Warming Potential (GWP) and non-renewable energy use (NRE), being an opportunity for coffee growers in the Use of waste from the coffee benefit process and the reduction of potential environmental impacts

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Ambiental, Director: Alexander Meneses Jácome. Codirector: Humberto Escalante Hernández

## Introducción

Colombia es el mayor productor de café suave arábigo del mundo, con 877,143 hectáreas de café sembradas y una producción aproximada de 13,6 millones de sacos en 2018<sup>1</sup>. Las actividades de siembra y beneficio del grano generan un impacto social, económico y ambiental significativo, en grandes zonas del territorio colombiano. El grano es producido por más de 540 mil familias y se estima que cerca de cuatro millones de colombianos dependen directa o indirectamente de este cultivo (Café de Colombia, 2018).

En el proceso del beneficio del café, se perciben problemáticas ambientales acentuadas, sobre las que aún no existe suficiente conocimiento científicamente soportado, para orientar de manera asertiva a soluciones tecnológicas para su corrección o mitigación de tal forma que estas sean compatibles con el contexto y el entorno de esta actividad.

Una de estas problemáticas ambientales es relativa al impacto sobre el recurso hídrico, siendo conocido que el beneficio del café utiliza grandes cantidades de agua, para el retiro del mucilago del grano, generando efluentes contaminados con alta carga orgánica, como lo demuestran antecedentes históricos (Zambrano e Isaza, 1999), corroborados por estudios relativamente recientes (Ramírez et al., 2015).

En el lavado tradicional del café o beneficio, se utilizan técnicas como el “canal de correteo”, donde se consumen hasta 40 L de agua/kg cps<sup>2</sup>. Otras técnicas, como el canal sin correteo, el semi-

---

<sup>1</sup>Un saco de café colombiano estándar tiene un peso de 60 kg.

<sup>2</sup>Café pergamino seco (cps: Denominación que corresponde al grano de café recubierto por una capa amarilla opaca con apariencia de pergamino al tacto, que resulta después de haber pasado por el proceso de beneficio y secado al sol o en secadores mecánicos).

sumergido y el tanque/tina consumen 18, 6.1 y 4.2 L de agua/kg cps respectivamente (Ramírez et al., 2015).

De esta forma, la preocupación principal de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), en cuanto a mitigación de impactos ambientales en la actividad caficultora, es la reducción del consumo de agua en la etapa de beneficio del grano y a través del Centro de Investigaciones del Café (CENICAFÉ), ha venido desarrollando tecnologías para tal fin. Es el caso del “desmucilaginador mecánico”<sup>3</sup> y más recientemente el denominado “ECOMIL”, que reducen el consumo de agua hasta 1 L/kg cps, con lo que también se busca un mayor ahorro de energía (Olivero et al., 2016).

Estas tecnologías han sido presentadas ante el gremio y los caficultores, como alternativas de “Beneficio Ecológico con Manejo de Subproductos” abreviadas en el acrónimo “BECOLSUB”, pero en realidad se desconoce el impacto ambiental asociado a su implementación y uso.

Comprobando esta percepción, un estudio reciente pone de manifiesto como las tecnologías que reducen el consumo de agua, aumentan la carga orgánica contaminante, la cual no ha sido caracterizada de forma completa y confiable, de tal manera que es difícil predecir el comportamiento de posibles sistemas de tratamiento en su manejo. Así mismo es difícil establecer, si es posible cumplir con la nueva normativa de vertimientos (MADS, 2015), la cual difícilmente sería satisfecha con la implementación de tecnologías anaerobias de bajo costo (e. g. UASB). Este mismo estudio, también revela la poca adaptabilidad de las tecnologías “Becolsub” a las condiciones socio-económicas del pequeño caficultor (Súarez Ávila et al., 2016).

---

<sup>3</sup>El desmucilaginador, es un dispositivo que remueve el mucilago del café por medios mecánicos y con lavado adicional de los granos.

Actualmente, los desmucilaginadores mecánicos, no representan más del 2% de las aplicaciones de beneficio en el país, debido a su costo comercial y la necesidad de instalar, por lo menos un sistema de tratamiento anaerobio para descontaminar los efluentes de pequeñas producciones familiares.

Además, si los reactores anaerobios no alcanzan el potencial suficiente para aprovechar el biogás producido, no hay incentivo económico para implementar el paquete tecnológico completo. Así por ejemplo en el Departamento de Santander, un 95 % de las fincas cafeteras no superan las 2 Ha y más del 61% de los efluentes del beneficio del café, son vertidos sin recibir tratamiento y los pocos sistemas existentes (e. g. filtros, sépticos y trampas de grasa), son inadecuados para manejar este tipo de efluentes (Suárez Ávila et al., 2016).

En este contexto, el presente estudio propone estudiar el Impacto Ambiental Potencial conexo a la implementación de la tecnología “Becolsub”, que acopla el desmucilaginador, a un sistema de tratamiento de efluentes con opción de recobro de energía en la forma de biogás, mediante una aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de vida (ACV).

## 1. Justificación

La presente investigación representa un desafío en varios niveles. En principio porque la gestión ambiental en Colombia y las normativas existentes, apuntan hacia enfoque de gestión basada en el sitio y no en el de ciclo de vida y en segundo lugar, por las dificultades metodológicas inherentes a la aplicación del ACV en el estudio de sistemas de gestión y tratamiento de efluentes de actividades agrícolas y agro-industriales, solos, es decir no incorporados a un ciclo de vida

productivo, como lo establece un estudio de revisión reciente en esta área (Meneses-Jácome et al., 2016).

Este estudio presenta un caso claro de “sistema residuo” con potencial aprovechamiento energético a través del biogás que se puede obtener en el sistema de tratamiento de efluentes, conexo a la unidad de beneficio de grano. Por lo tanto, en ACV se configura una situación de sistema multifuncional, con posible desplazamiento de funciones energéticas en la frontera, que generalmente se resuelve mediante un enfoque de ACV consecucional. Una de las guías principales para resolver esta dificultad metodológica, han sido algunas directrices derivadas de estudios que tratan problemas afines en otros sectores agro-industriales, de tal manera que en este aspecto se representa una de las principales contribuciones del presente trabajo (Meneses-Jácome et al., 2016; Papong et al., 2014).

En lo estrictamente relativo a los resultados esperados de la aplicación del ACV, el estudio busca establecer el nivel de compatibilidad ambiental de la tecnología de beneficio denominado “Becolsub”, la cual ha sido presentada a los caficultores colombianos, como la principal opción para la protección del recurso hídrico en la producción de café. De esta forma se espera establecer, si esta compatibilidad ambiental puede ser mejorada a través del acople de un sistema anaerobio para el tratamiento de efluentes, que genere biogás como vector energético con algún uso potencial, para los pequeños productores del grano.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Evaluar el Impacto Ambiental Potencial del proceso de Beneficio Ecológico del café (BECOLSUB) en el contexto de una pequeña unidad de producción cafetera.

### 2.2 Objetivos Específicos

1. Analizar el estado del arte relativo a los procesos de beneficio ecológico, secado y tratamiento de aguas residuales del café y estudios de impacto ambiental de estas tecnologías en el contexto Colombiano y Regional.
2. Elaborar el inventario del proceso BECOLSUB, aplicando un enfoque híbrido según lo establecido en la aplicación de la metodología ACV.
3. Evaluar el impacto Ambiental Potencial según ACV del proceso BECOLSUB con base en una unidad funcional o flujo de referencia relativo a las aguas residuales generadas (escenario de línea base).
4. Comparar la sensibilidad de los resultados del Impacto Ambiental Potencial a la inclusión o no del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio(SMTA), de las aguas residuales del café incluyendo o no el aprovechamiento energético del biogás.

### 3. Marco Conceptual

El entendimiento general del presente estudio, demanda ampliar algunos aspectos conceptuales relativos a la producción cafetera; específicamente nociones técnicas y conceptuales del proceso y las etapas del Beneficio del café, y así mismo lograr una mejor comprensión de las problemáticas ambientales asociadas al mismo, además de adquirir una cierta familiaridad con el lenguaje técnico del sector, en especial lo relacionado con los procesos considerados en el ciclo de vida a evaluar.

#### 3.1 Proceso de beneficio del café

En las fincas cafeteras de Colombia se cultivan variedades de café como Caturra, Tabi, Colombia, Castillo y Cenicafé, estas dos últimas resistentes a la roya del cafeto, principal enfermedad del cultivo en Colombia (Flórez et al., 2018). En general, el grano es sometido a un conjunto de operaciones durante el Proceso de Beneficio por vía Húmeda del café (PBHC), en un área destinada para tal fin<sup>4</sup>, donde se transforma el grano de café cereza en café pergamino seco (cps)<sup>5</sup>- (Puerta et al., 2000).

Actualmente, el PBCH trata de reducir los efectos ambientales adversos asociados al lavado y secado del grano, al tiempo que busca conservar la calidad exigida por las normas de

---

<sup>4</sup> El beneficiadero de café generalmente contempla, las siguientes áreas y equipos: tolva de recibo en seco, despulpadoras, desmucilagadoras, tanques fermentadores, canales para el lavado, patios escurridores, patios de secado y/o secadoras mecánicas, costales y sitios para el almacenamiento.

<sup>5</sup>Relación café cereza - café pergamino seco: Cantidad de café cereza requerido para obtener 1 kg de café pergamino seco (c.p.s.) “tipo Federación”. Para producir 1 kg de cps se necesitan 5 kg de café cereza en promedio (Montilla et al., 2008).

comercialización del producto y evitar pérdidas durante el proceso. Así, el principal reto técnico del beneficio del grano consiste en reducir el consumo excesivo de agua y lograr el aprovechamiento de los subproductos generados en el proceso (Rodríguez et al., 2010).

El proceso de Beneficio Ecológico del café (figura 1), es la novena etapa del proceso productivo del café, correspondiente a actividades de post-cosecha y se realiza según las etapas descritas en el Anexo 1., siendo las más importantes las de fermentación, lavado y secado:

- **Fermentación:** Tiene como objetivo hacer que el mucílago que cubre el grano del café se descomponga y una vez fermentado se disuelva en agua, eliminándose por medio del lavado. Se realiza en el tanque tina y su duración oscila entre 12 y 18 horas, según las condiciones climáticas.
- **Lavado:** Se hace con agua limpia en cuatro enjuagues. El mucilago fermentado es retirado del café lavándolo en el tanque de fermentación teniendo un consumo específico de agua de 4.2 L/kg de café pergamino seco, la contaminación generada en términos de demanda química de oxígeno (DQO), se estima es de 30 DQO/kg de café cereza y representa el 26.3 % de la contaminación potencial generada por el beneficio húmedo del café (Rodríguez et al., 2015).
- **Secado:** Se puede realizar mediante un proceso natural o artificialmente, según la escala de producción. El secado natural aplica para bajas producción es donde se aprovecha la energía solar y el viento, exponiendo el grano de café en patios, carros secadores o marquesinas. Por su parte el secado artificial aplica para producciones mayores o en sitios donde las condiciones climáticas de alta humedad, requieren el uso de secadoras o silos mecánicos, que utilizan diferentes tipos de combustible (e. g. carbón, gasolina, ACPM, gas, GLP) - (Cenicafé 2013).

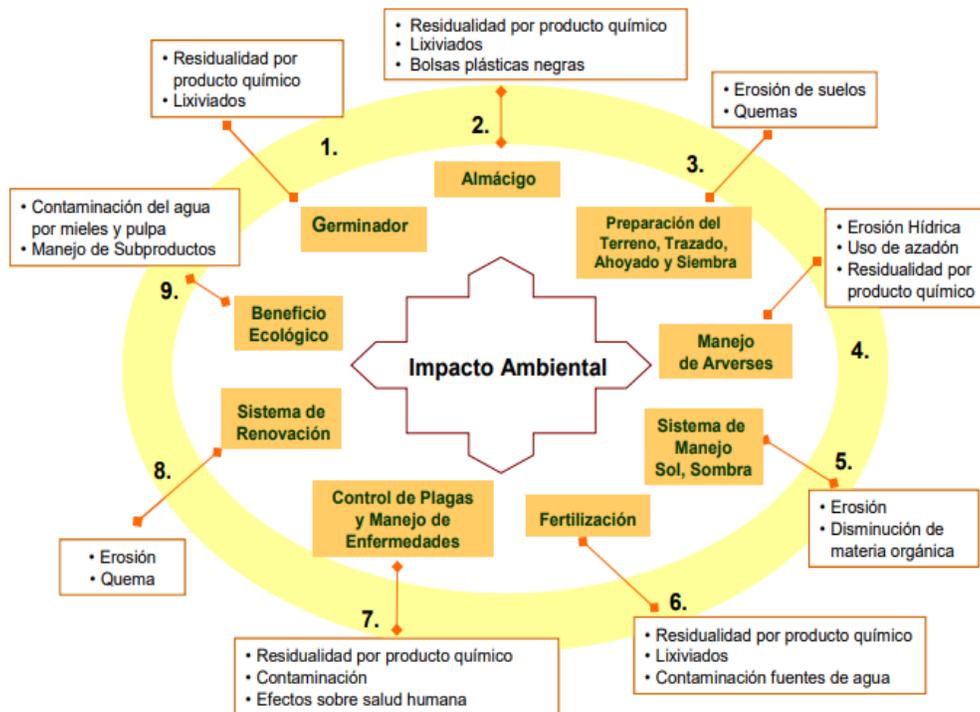


Figura 1. Proceso Productivo del café. Adaptado de: Café de Colombia (2019) Guía ambiental para el sector cafetero

**3.1.1 Beneficio ecológico del café (BECOLSUB).** La tecnología BECOLSUB fue desarrollada en Cenicafé para realizar la tarea de desmucilaginar, lavar y limpiar el café en un solo equipo, para obtener café de alta calidad y reducir la contaminación potencial de las fuentes de agua ocasionada por la pulpa y el mucilago<sup>6</sup> al aplicar el proceso de fermentación natural. BECOLSUB integra diferentes desarrollos de investigación, como el despulpado con mínima adición de agua, el desmucilagador de flujo ascendente (DESLIM) y el manejo integrado de subproductos (pulpa y mucilago), retirados en el tornillo sin fin del dispositivo donde se transportan para procesamiento de abono orgánico (fosas de café) - (Rodríguez et al., 2010).

<sup>6</sup>El **mucilago** es una estructura semilíquida, rica en azúcares y pectinas que cubre el endospermo de la semilla y mide aproximadamente 0.4 milímetros de espesor. Esta capa mucilaginosa (mesocarpio) representa aproximadamente el 22% del peso del café en baba y el 13% del peso de la cereza (Rodríguez et al., 2015).

El desmucilaginado mecánico es realizado por módulos de acuerdo a su capacidad (anexo 2), los cuales permiten remover rápidamente el mucilago con ventajas sobre la fermentación natural como: reducción significativa del consumo de agua en un rango entre 0.7 a 1.1 L/kg de cps. y reducción de la contaminación, ya que las mieles altamente viscosas mezcladas con la pulpa retienen más del 60% de los efluentes líquidos, logrando manejar en un 90% la contaminación generada en el proceso (Ramírez et al., 2015).

### 3.2. Secado Mecánico (SILO)

En el proceso de secado, el contenido de humedad del café se reduce de 53% a 10-12%, el cual es el rango de comercialización donde el grano es capaz de preservar su calidad física, organoléptica e inocuidad a hongos y bacterias por amplios períodos de tiempo, en condiciones típicas de almacenamiento de las bodegas cafeteras. En los secadores mecánicos o silos, un flujo forzado de aire pasa por un intercambiador de calor y una cámara de secado, donde el aire caliente entra en contacto con los granos de café, en un proceso cercano a las 18 horas. En Colombia se utilizan silos de capa estática, con 2 a 3 capas de granos, de 20 a 40 cm de altura, temperaturas de  $50\pm 3^{\circ}\text{C}$  y flujos de aire del orden de  $100\text{ m}^3\text{min}^{-1}$  por ton. cps. Además del secador estático sin cámara de pre-secado, también se utiliza el denominado “silo-secador Cenicafé” entre otros secadores comerciales, que también cuentan con sistemas de inversión periódica del sentido del flujo de aire cada 6 a 12 horas (Anexo 2)- (Parra et al., 2008).

La tabla 1 relaciona los combustibles más utilizados en los silos para secado de café, los cuales generan impactos ambientales por emisiones atmosféricas, especialmente de  $\text{CO}_2$  cuando se utiliza carbón, gas o GLP. Actualmente se trata de estimular el uso de la cascarilla o cisco del café

producto de la trilla, como biocombustible de carbono neutral disponible al interno de la cadena productiva del grano (Gutiérrez, 2011).

Tabla 1.

*Poder calorífico de combustibles utilizados en el secado del café*

Combustible	Poder Calorífico	
	(kJ. Kg <sup>-1</sup> )	(kJ.m <sup>-3</sup> )
Cisco de café <sup>7</sup>	17.94	-
GLP	46.35	-
Hulla (antracita)	33.44	-
Carbón vegetal	27.45	-
Biogás	-	17.09
Leña (20% humedad)	15.41	-

Nota. Tomado de Cenicafé (2013) *Manual del Cafetero Colombiano*

### 3.3 Problemáticas ambientales conexas al beneficio del café

Además de la ya mencionada afectación del recurso agua, se producen subproductos sólidos, que de no ser manejados de forma adecuada son fuente adicional de contaminación. El principal subproducto sólido es la pulpa del grano, la cual es transportada sin utilizar agua hasta un sitio de descomposición, generalmente una fosa de compostaje o una cama de un lombricultura. El compost resultante sirve como complemento nutricional o como mejorador de los suelos en el cultivo o almacigo. Cuando se utilizan desmucilaginosos mecánicos, el mucílago puede

<sup>7</sup>Por cada 100 kg de c.p.s se obtienen 18 kg de cisco, el cual es utilizado como combustible para secar en el silo de café 6.3 kg de cps (Montilla et al., 2008).

utilizarse para enriquecer la pulpa el cual es mezclado por el tornillo sin fin (Zambrano et al., 2010).

**3.3.1 Tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café.** Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del café son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente. Tienen una elevada concentración de materia orgánica en términos de DQO, del orden de 15,000 a 30,000 ppm en las aguas mieles y de 60,000 a 120,000 ppm en los lixiviados de la mezcla pulpa-mucílago, así como un pH bajo o alta acidez, factores que en conjunto representan un alto impacto ambiental para los ecosistemas receptores (Rodríguez et al., 2009).

La normatividad colombiana de vertimientos indica que, para la disposición de los efluentes del café al suelo, se deben cumplir las condiciones técnicas de descarga establecidas en la Resolución 631 del 2015 (MADS, 2015) y las adiciones dadas por la autoridad ambiental<sup>8</sup>. Los límites para vertimientos del beneficio del café, se enmarcan en los valores límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales no domésticas, según resumen de la norma (tabla 2). Adicionalmente, el generador del vertimiento debe realizar una caracterización completa (física, química y biológica) del cuerpo de agua receptor y determinar la dirección de flujo y área de disposición de los vertimientos (MADS, 2015)<sup>9</sup>.

Cenicafé, diseñó un prototipo de sistema de tratamiento denominado SMTA (Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio) y propende expandir su uso en el gremio caficultor. El SMTA está compuesto por dos unidades independientes que permiten la separación de fases de la digestión

---

<sup>8</sup>Aplica el decreto 1076 del 2015, que establece que El Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) fijará los parámetros y límites máximos permisibles de los vertimientos y la autoridad ambiental local dictará, permiso de vertimientos, la norma de vertimiento aplicable y las condiciones técnicas de la descarga.

<sup>9</sup> Decreto 50 de enero del 2018.

anaerobia, es decir, un reactor hidrolítico-acidogénico (RHA), seguido de un reactor metanogénico (RM), según figura 2. El SMTA aprovecha las pendientes de las fincas cafeteras para hacer flujo por gravedad. Los tanques de los reactores son en polietileno de color negro, lo que ayuda a lograr temperaturas de 30°C, favorables para los procesos biológicos. Se estima que el RHA elimina hasta un 20% de la contaminación orgánica original de las “aguas mieles”, mientras que las eficiencias de remoción promedio del RM son del orden de 80% de DQO, 83% de DBO<sub>5</sub>, 74.3% de SST y 46% de sólidos totales (Orozco, 2003; Zambrano et al., 2006, Ramírez et al., 2015). Detalles sobre los demás componentes del SMTA son ampliados en el Anexo 3.

Tabla 2.

*Resumen de la normativa de vertimiento aplicable al beneficio del café*

Parámetro	Unidades	Beneficio de café	
		Clasificación de la FNC /Cenicafé	
		Proceso Ecológico	Proceso Tradicional
pH	Unidades	5.0 - 9.0	5.0 - 9.0
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/LO <sub>2</sub>	3,000	650
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>		400
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	800	400
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	10	10

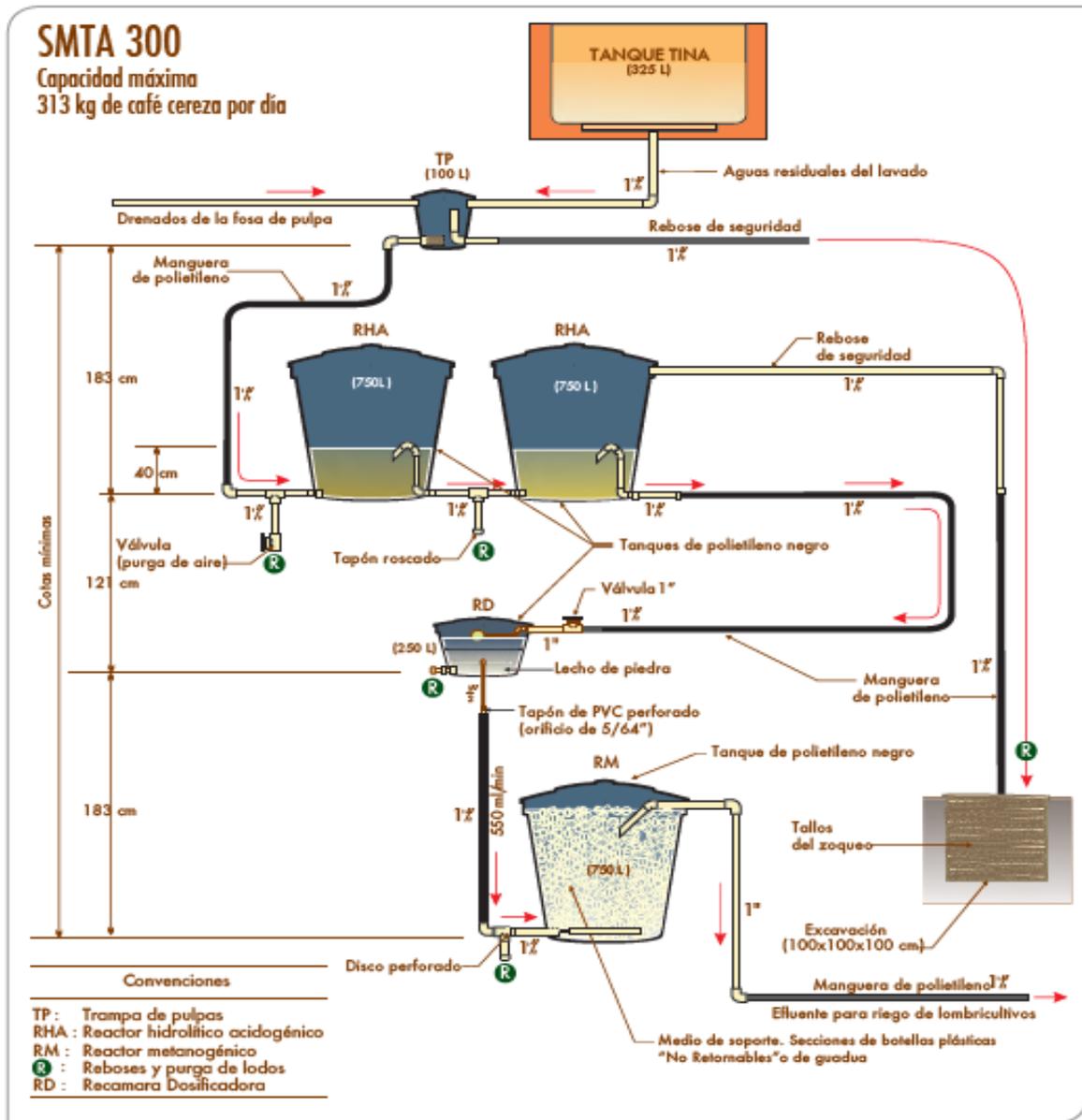


Figura 2. Esquema y dimensionamiento típico de un SMTA 300. Adaptado de: Zambrano et al., (2006).

**3.3.2 Producción de biogás a partir del SMTA.** El reactor metanogénico (RM) es la unidad más importante del SMTA. En él ocurre la etapa final de la digestión anaerobia, donde la contaminación soluble, principalmente en la forma de ácidos orgánicos se transforma en biogás, mayoritariamente constituido por metano ( $\text{CH}_4$ ). El RM generalmente es inoculado con estiércoles

frescos, vacunos o porcinos, como fuente de microorganismos metanogénicos y durante su arranque se adicionan fuentes externas de carbono y de nitrógeno para equilibrar la relación C/N y obtener un pH cercano a 7 (Orozco, 2003; Zambrano et al., 2006).

Aunque en la literatura del sector no se brinda información sobre la composición aproximada de este tipo de biogás, se estima que su poder calorífico es del orden de 17 a 25 MJ/m<sup>3</sup>, es decir ~30% menos que el gas natural (Icontec & Aene 2003). La tabla 3 resume algunas cifras prácticas, para proyectar aplicaciones del biogás en contextos rurales.

Tabla 3.

*Consumo de Biogás en algunas aplicaciones en contextos rurales*

<b>Equipo</b>	<b>Consumo en m<sup>3</sup>/h</b>
Estufa de cocina	0.15 - 0.20
Lámpara de Gas	0.10
Calentadores (cría de animales)	0.15 - 0.25
Motor Biogás - diesel por b.h.p.	0.42
Producción de 1 KWh de corriente eléctrica con una mezcla diesel - Biogás.	0.70

Nota. Tomado de: Icontec & Aene (2003)

#### **4. Estado del arte: aplicaciones del acv en el sector caficultor**

Las metodologías de evaluación de impacto ambiental, tratan de analizar de forma sistemática los efectos causados en el medio ambiente por un producto o un proceso, mediante una valoración cuantitativa o una cualitativa, previa selección y medición de categorías de Impacto relevantes. De

esta manera, la metodología de evaluación de impacto ambiental potencial más extendida y aceptada, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV); herramienta que permite cuantificar los impactos ambientales de un “producto” o una “función tecnológica” en su “ciclo de vida”, desde su origen hasta su fin de vida (Ekvall et al., 2007; Finnveden et al., 2009).

En general, el presente trabajo se apoya en la escasa experiencia documentada sobre ACV de sistemas de tratamiento de efluentes agrícolas y agroindustriales (Meneses et al., 2016) y en particular en algunos estudios de sostenibilidad ambiental, disponibles para la cadena productiva del café, desarrollados en otros contextos geográficos y socio-económicos (Adams & Ghaly, 2007; Cárdenas & Vásquez, 2013).

En principio, se han podido identificar algunos casos de ACV solo o complementado por otras metodologías (Díaz et al., 2006). En Honduras se realizó un estudio de la cadena productiva del café por ACV, donde se incluyó la etapa de cultivo, el procesamiento, la distribución y la disposición final de los residuos producidos, utilizando el software Umberto 5.5. Este estudio también incluyó una comparación de la producción y el procesamiento de café orgánico con respecto al café producido de forma tradicional.

En Costa Rica, se identificaron las tecnologías que podrían hacer uso de los subproductos del sistema de procesamiento del café, mediante un método de análisis multi-criterio soportado sobre un ACV de base o primario. Este estudio, estuvo orientado a evaluar innovaciones capaces de promover condiciones de sostenibilidad integral en la producción cafetera. Además de valorar resultados de la evaluación de impacto ambiental potencial, consideró aspectos relativos al uso eficiente de los recursos, valor social y económico agregado. Entre los aspectos evaluados como parte del ciclo de vida innovador, se incluyó el uso de sistemas de digestión anaerobia para tratar

los efluentes y producir bioenergía y el uso de hornos de secado del grano que utilizan cascarilla de café como combustible (Adams & Ghaly, 2007).

En Colombia, el estudio más cercano a la filosofía ACV o a métodos de evaluación de impacto ambiental potencial, fue desarrollado por Cenicafe, el cual consistió en la determinación del balance de energía del cultivo del café, basado en la contabilidad de las fijaciones y emisiones de dióxido de carbono para tres tipos de sistemas productivos cafeteros, ubicados en los departamentos del Valle del Cauca y Quindío, con condiciones diferenciadas de sombra o exposición a la radiación solar. Los resultados dieron pautas para establecer compensaciones por servicios ambientales relativos a la capacidad de captura de carbono, en el cultivo del café con o sin sombra. (Arias et al., 2013).

Más escasos resultan los estudios ACV que se concentren de manera exclusiva en los sistemas de tratamiento de los residuos como ciclos de vida propios, aislados de la cadena productiva principal, como es el caso del presente trabajo (Meneses et al., 2016). Sin embargo, en el sector agrícola y agro-industrial es posible identificar algunos antecedentes.

Es el caso de un estudio histórico de ACV sobre la producción y aprovechamiento de biogás en digestores anaerobios utilizados para el tratamiento de efluentes del procesamiento de caña de azúcar (Contreras et al., 2009) y más recientemente el ACV aplicado a la evaluación de alternativas de aprovechamiento de biogás producido en reactores UASB para el tratamiento de las aguas residuales de la producción industrial de almidón de yuca en Tailandia (Papong et al., 2014), mientras que en el caso de Colombia, existe el antecedente del ACV aplicado a encontrar formas sostenibles de utilizar el biogás, potencialmente disponible en las plantas de tratamiento de efluentes del sector avícola (Meneses-Jácome et al., 2015).

## 5. Aplicación de la metodología “ACV”: aspectos generales

El ACV es una metodología de valoración del impacto ambiental potencial, que analiza las contribuciones de las entradas (materias primas, recursos naturales, etc.) y salidas (productos, emisiones, desechos etc.), del ciclo de vida de un producto o sistema, a distintas categorías de impacto (e. g. cambio climático, acidificación, toxicidad, etc.), aceptadas por consenso científico. Este perfil ambiental conformado por indicadores, permite identificar etapas e impactos críticos, con el objeto de formular estrategias de mejora ambiental. También puede establecer diferencias entre los impactos potenciales de sistemas alternativos de producción y por lo tanto, puede ser usado, para orientar la elección entre escenarios tecnológicos (ISO 14040, 2006; Finnveden et al., 2009).

El presente estudio ACV acoge las cuatro etapas requeridas por el desarrollo de la metodología: (i) Definición del Objetivo y Alcance, (ii) Análisis de Inventario, (iii) Evaluación del Impacto e (iv) Interpretación de Resultados, de acuerdo con las normas ISO 14040 y subsiguientes (ISO 14040, 2006).

### 5.1 Definición del objetivo y alcance

El propósito del estudio es evaluar el impacto ambiental potencial del proceso de Beneficio Ecológico del Café (BECOLSUB). Se toma como referencia o caso de estudio, una pequeña producción cafetera en el Municipio de Pinchote (departamento de Santander), donde se aplica

esta tecnología. Esta finca tiene establecidas 11 Ha de café, que producen ~25,000 kg cps. (200 cargas de café/año), con picos de cosecha de 4,500 kg de café cereza/día, y una generación media de 3.6 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales. Los residuos generados en un día de cosecha son del orden de 1,962 kg de pulpa de café y 670,6 kg de mucílago<sup>10</sup>, en un total 2,632.5 kg de residuos. Además del BECOLSUB, en este caso, se propone el uso de un silo de secado y la implementación del SMTA. Por lo tanto, el estudio incluye la valoración energética del biogás producido en el SMTA como fuente de energía que puede reemplazar el GLP del silo, eliminando total o parcialmente el transporte de las pipetas de GLP hasta la finca cafetera.

**5.1.1 Enfoque ACV.** El presente ACV se declara como “comparativo consecuencial”, de tres escenarios que se configuran por ampliación de las fronteras, como resultado de la inclusión de etapas de ciclo de vida adicionales sobre un escenario de línea base. Los escenarios en referencia se resumen en la figura 3 y son los siguientes:

- (i) Escenario 1 o "línea base": estado actual del proceso de beneficio, utilizando BECOLSUB, secado con un silo a GLP y sin tratamiento de efluentes;
- (ii) Escenario 2 o "escenario alternativo": incluye la implementación del SMTA, pero sin uso energético del biogás producido;
- (iii) Escenario 3 o de “substitución”: incluye el uso energético del biogás producido en el SMTA, desplazando el uso de GLP en el silo de secado.

---

<sup>10</sup>Los rendimientos y la composición química del grano de café pueden modificarse por factores como la variedad, la fertilidad del suelo, las condiciones atmosféricas, el manejo agronómico, la edad de la plantación, el manejo de las plagas y enfermedades y el control de las mismas. En el período de cosecha, el contenido de humedad del café cereza y la recolección influyen en los rendimientos y las características del grano; además, un café cultivado eficientemente, puede perder sus cualidades inherentes como consecuencia de un inadecuado proceso de beneficio (Cenicafé 2013).

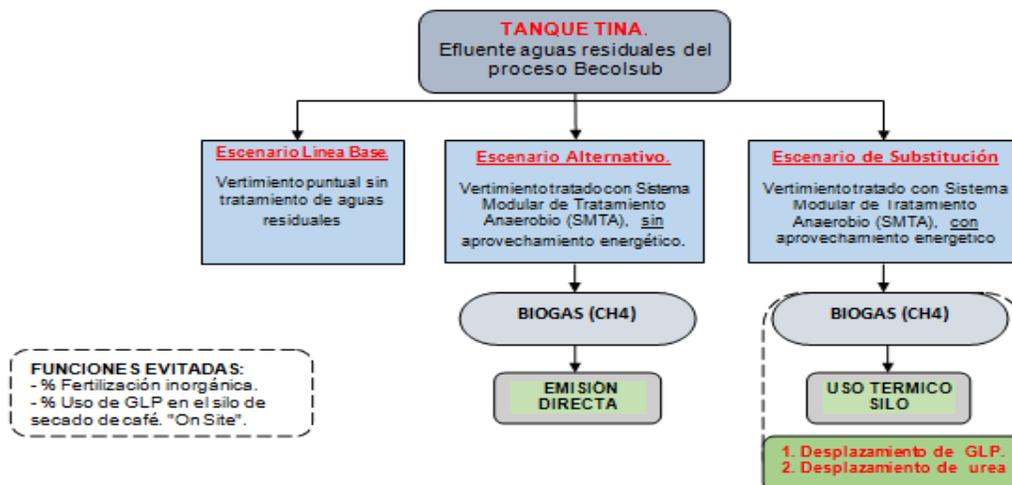


Figura 3. Resumen de los escenarios de ciclo de vida considerados en el presente estudio

**5.1.2 Fronteras del sistema.** Las fronteras del sistema en los escenarios “Línea Base”, “Alternativo” y de “Substitución” se definen según las figuras 4, 5 y 6, respectivamente. Las fronteras incluyen en todos los escenarios, la transformación del fruto de café cereza recolectado, desde el recibo en la tolva, hasta llegar a café pergamino seco, pasando por el despulpado, BECOLSUB (desmucilagador + tornillo + tanque tina) y el secado. Los escenarios que incluyen el SMTA, complementan la descripción de su frontera con la figura 2.

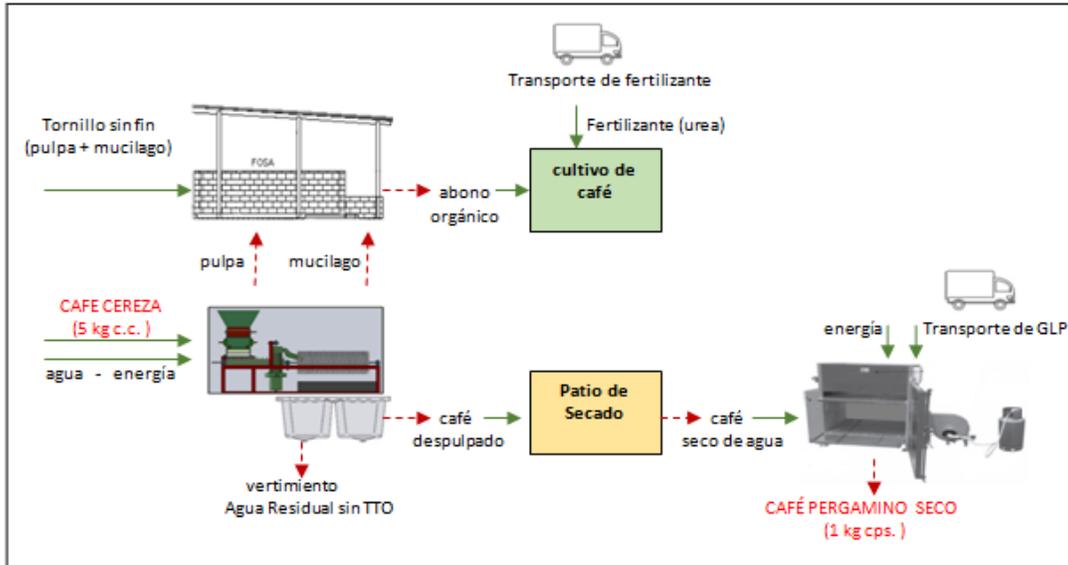


Figura 4. Etapas de ciclo de vida consideradas en el Escenario de Línea Base

El escenario de “substitución”, es particularmente interesante desde el punto de vista metodológico, debido a que con la valorización del biogás se configura un proceso multifuncional, cuyo análisis procede por un enfoque consecucional, que incluye el análisis de las funciones evitadas o desplazadas en las fronteras del sistema, en este caso, el reemplazo de GLP con biogás.

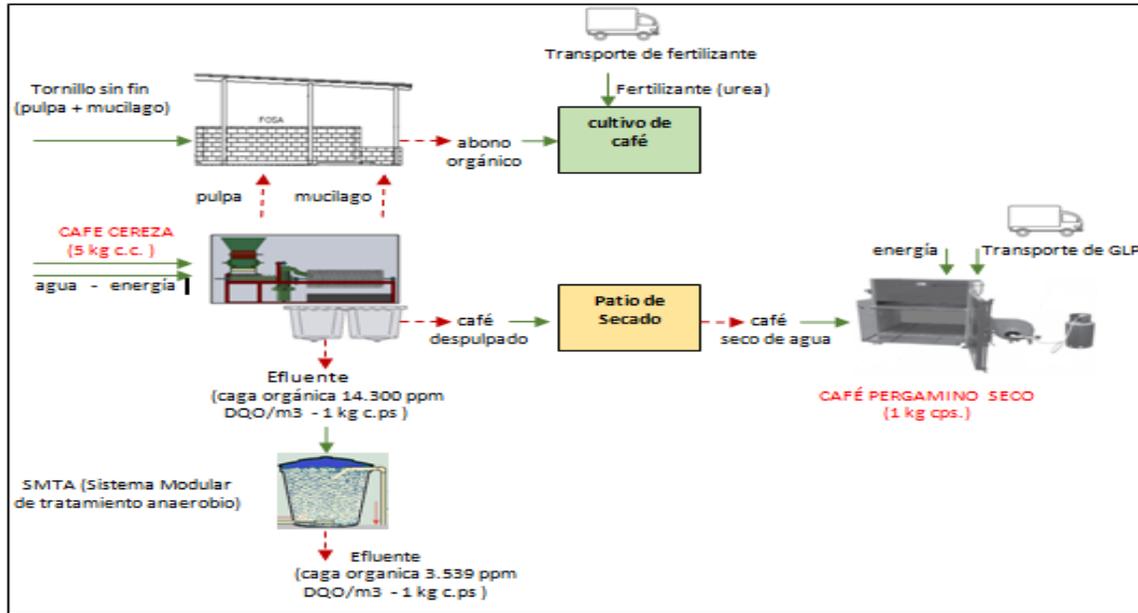


Figura 5. Etapas de Ciclo de vida consideradas en el Escenario “Alternativo”

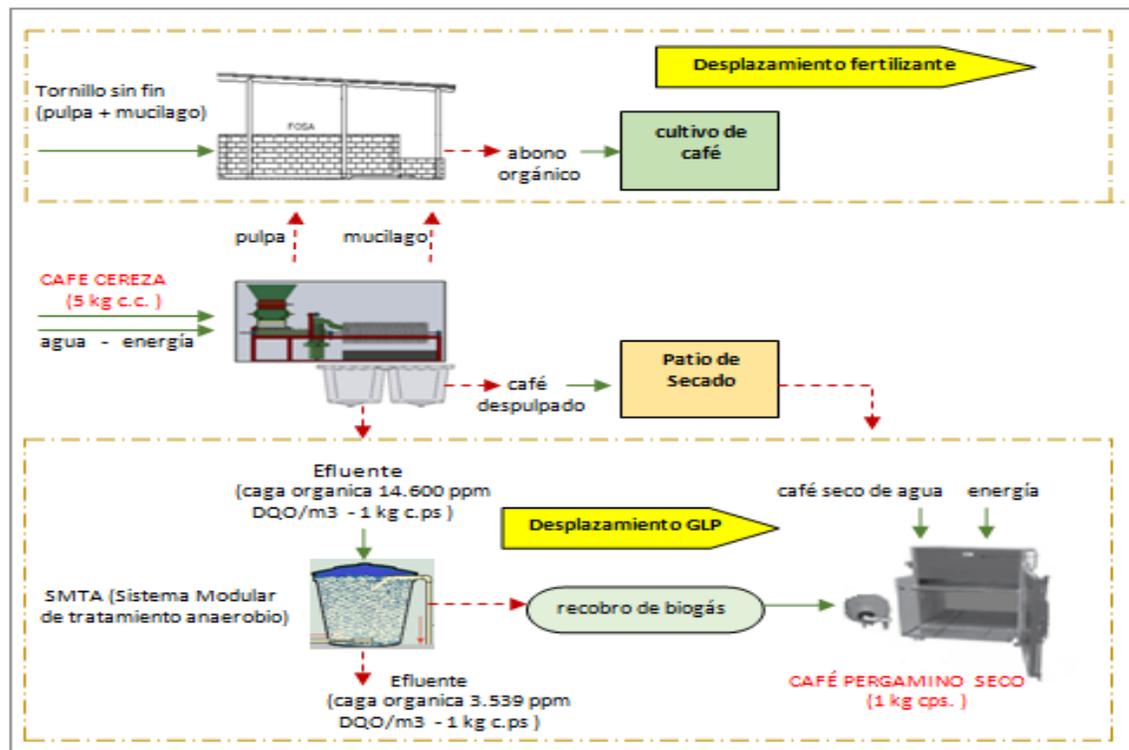


Figura 6. Etapas de Ciclo de vida consideradas en el Escenario de “Substitución”

**5.1.3 Función y unidad funcional.** La función estudiada es la gestión del agua residual generada durante la producción de 1 kg de café pergamino seco (1 kg de cps), beneficiado mediante el proceso BECOLSUB e incluye la posible valorización del biogás producido en el STMA. Por consiguiente, todas las entradas y salidas del inventario de ciclo de vida son referidas a 1 kg de cps.

## **5.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV).**

Se recolectaron datos provenientes de revisión de la literatura del sector y de fuentes primarias o de campo, que se combinaron con algunos datos de la base Ecoinvent acoplada al software SimaPro, dando lugar a un inventario híbrido, donde se caracterizan las principales entradas y salidas (Inputs-Outputs) de los distintos subprocesos que conforman los tres escenarios de ACV considerados como objeto de estudio.

El caso de estudio provee información basada en la operación de un módulo “BECOLSUB 1000” que beneficia 1,000 kg de café cereza/hora, con un consumo de agua de 1.2 L/kg cps. También considera la operación de un silo a GLP con capacidad para procesar 6 cargas de café (750 kg de cps). Se confirmaron la cantidad de grano recolectado en un día pico de cosecha, la cantidad de pulpa generada y las potencias del motor del desmucilagador y la despulpadora, así como las horas efectivas de operación. Información complementaria de los subprocesos desmucilagador, silo y vertimiento, se encuentra recopilada en los Anexos 4, 5 y 6 respectivamente.

**5.2.1 Descripción de flujos elementales y económicos por escenario.** En las figuras 7 a 9 se describen los principales flujos elementales y económicos considerados para cada escenario a estudiar del ciclo de vida objeto de estudio. Es el caso de las entradas de electricidad, combustible, agua, café en pulpa, transportes utilizados, café despulpado, emisiones, productos y subproductos, cuyos datos e información detallada se recopilan en los Anexos 5 a 7.

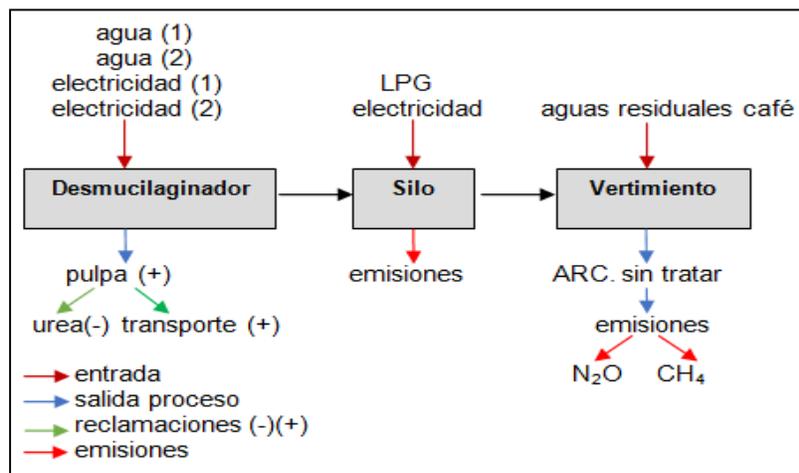


Figura 7. Principales flujos elementales y económicos del escenario de línea base.

**5.2.2 Reglas de inclusión y exclusión.** En la tabla 4 se relacionan las principales fuentes de emisiones y vertimientos consideradas en el estudio. Las principales reglas de exclusión del ciclo de vida considerado, fueron aplicadas a las emisiones al suelo, por efecto de la descarga del lodo producido por el SMTA, el estiércol inoculado en el SMTA para el tratamiento anaerobio, otro fertilizante inorgánico diferente a la urea potencialmente desplazado y las emisiones debidas a la descomposición de la materia orgánica en la fosa de la pulpa de café.

Esto se debe a que las emisiones generadas por el lodo producido en el sistema de tratamiento, se consideran potencialmente compensadas por las emisiones de estiércol que se dejaron de producir por la utilización como inóculo en el proceso anaerobio, considerándose un potencial

beneficio ambiental. Adicionalmente, hay dificultades para validar las cantidades producidas y evitadas con total rigor, por lo que en prácticas agrícolas se puede considerar la aplicación de estas consideraciones como sustento de exclusión en el inventario (Moller, J., Boldrin et al., 2009).

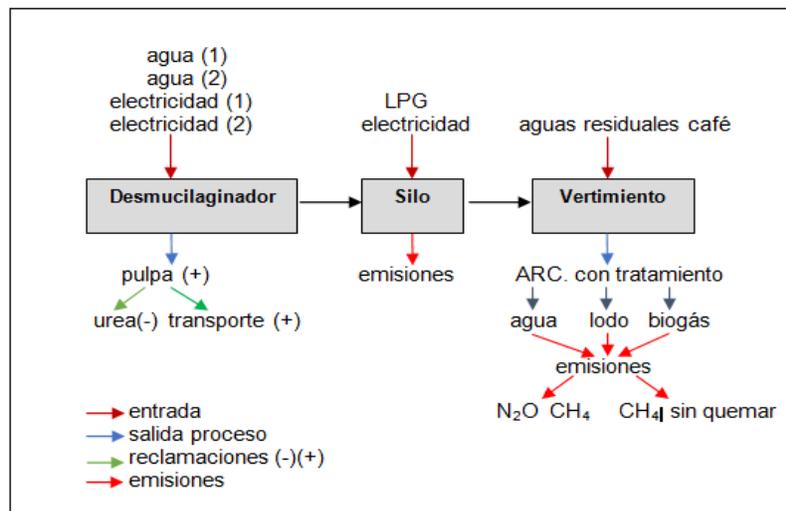


Figura 8. Principales flujos elementales y económicos del escenario alternativo.

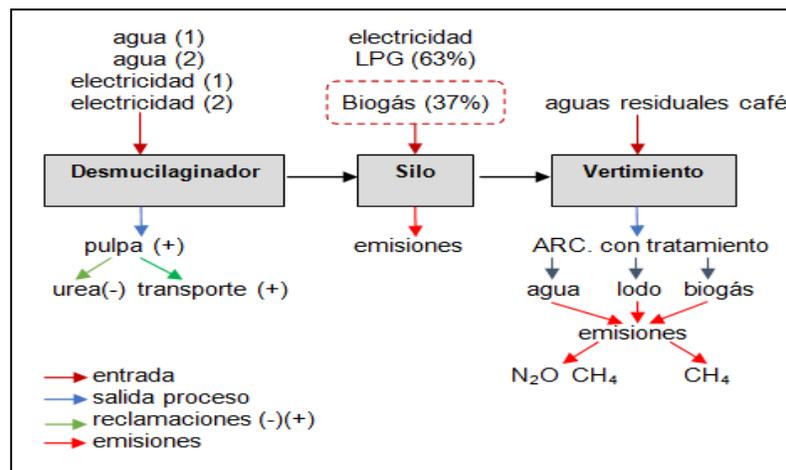


Figura 9. Principales flujos elementales y económicos del escenario de sustitución.

En resumen, no se reclaman beneficios de la producción de lodos como sustituto de fertilizantes inorgánicos. Por el contrario, se reclama la cantidad de fertilizante nitrogenado (e. g.

urea), remplazado por el uso del abono orgánico producido en el BECOLSUB. La pulpa es considerada en Simapro como un biodesecho y en su favor reclama la captura de emisiones de CO<sub>2</sub>-eq., por este concepto. Igualmente, en el escenario de sustitución se reclama el beneficio del transporte de GLP evitado hasta la finca, por el uso del biogás producido en el SMTA.

Tabla 4.

*Reglas de inclusión en el proceso de Beneficio del café*

EMISIONES	PROCESO			
	BECOLSUB	SILO	VERTIMIENTO	
			SIN SMTA	CON SMTA
Electricidad	X	X		
GLP <sup>(i)</sup>		X		
Agua Residual			X	X
Pulpa	X			
Biogás <sup>(ii)</sup>		X		

(i) Emisiones por la quema GPL en el escenario de línea base (100%) y emisiones por la quema de GLP en el escenario de sustitución (63%); (ii) Emisiones por la producción de biogás sin aprovechamiento en el escenario alternativo (100%) y emisiones por la quema de biogás producido.

#### 4.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

Las categorías y métodos de evaluación de impacto seleccionados en el presente estudio corresponden a las sugeridas en un estudio previo, sobre la aplicación de metodologías de evaluación ambiental y sostenibilidad a sistemas de tratamiento de efluentes agro-industriales con producción y valorización de la bioenergía recuperada en curso de su tratamiento (Meneses-Jácome et al., 2015), campo de estudio en el cual se enmarca el presente trabajo. La tabla 5 resume

las categorías de impacto y métodos que se aplican en la evaluación de impacto ambiental potencial en los distintos escenarios de ciclo de vida considerados en este trabajo. Estas categorías y métodos están disponibles en la herramienta computacional SimaPro utilizada en esta fase del estudio.

Tabla 5.

*Métodos y categorías de impacto sugeridos para ACV de sistemas de tratamiento de aguas residuales agro-industriales con recobro de energía*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Categoría (unidades)</b>	<b>Método</b>
Potencial de Acidificación ( <b>AP</b> )	kg SO <sub>2</sub> -eq.	CML 2001
Eutrofización ( <b>EP</b> )	kg PO <sub>4</sub> -eq.	CML 2001
Poder de calentamiento Global ( <b>GWP</b> )	kg CO <sub>2</sub> -eq.	IPCC 100a
Respiratorios Inorgánicos ( <b>RESPI</b> )	kg PM <sub>2.5</sub> eq.	IMPACT 2002+
Uso de energía no renovable ( <b>NRE</b> )	MJ	IMPACT 2002+

Nota. Tomado de: Meneses-Jácome et al., (2016).

#### 5.4 Interpretación del estudio

Esta etapa procede en concordancia con el objeto y alcance establecidos, así como con la tipología de ACV declarada. De esta forma, el enfoque utilizado en la interpretación responde en principio a la comparación entre escenarios, tomando como referente el análisis de caracterización correspondiente a cada una de las categorías de impacto previamente seleccionadas. La interpretación de los resultados del escenario 3 o de sustitución, asume un enfoque de ACV

consecuencial en consideración del desplazamiento de algunas funciones en las fronteras del sistema, especialmente por el aprovechamiento energético del biogás.

## 6. Resultados

### 6.1 Análisis de inventario

**6.1.1 Escenario línea base (vertimiento sin tratamiento).** El escenario de línea base representado en la figura 10, muestra en la forma de diagrama de flujo, el análisis de inventario de cada uno de los subprocesos tomando como referencia la producción de 1 kg de cps., definida como la Unidad Funcional del Proceso BECOLSUB<sup>11</sup>. Los Anexos 4 a 6 muestran de forma ampliada los datos que constituyen el inventario del ciclo de vida objeto de estudio en sus distintos escenarios.

---

<sup>11</sup>En el proceso BECOLSUB se utiliza la cantidad de agua estrictamente necesaria para el lavado y mezcla del grano y el transporte de los subproductos pulpa y mucílago concentrado, hasta un depósito temporal, que es en promedio 1 a 1.2 L /kg cps. En el proceso BECOLSUB con fermentación natural se utilizan hasta 4 L de agua/kg cps, por lo que la DQO de los efluentes disminuye de 27,000 a 14000 mg DQO/L (Pabón et al., 2009).

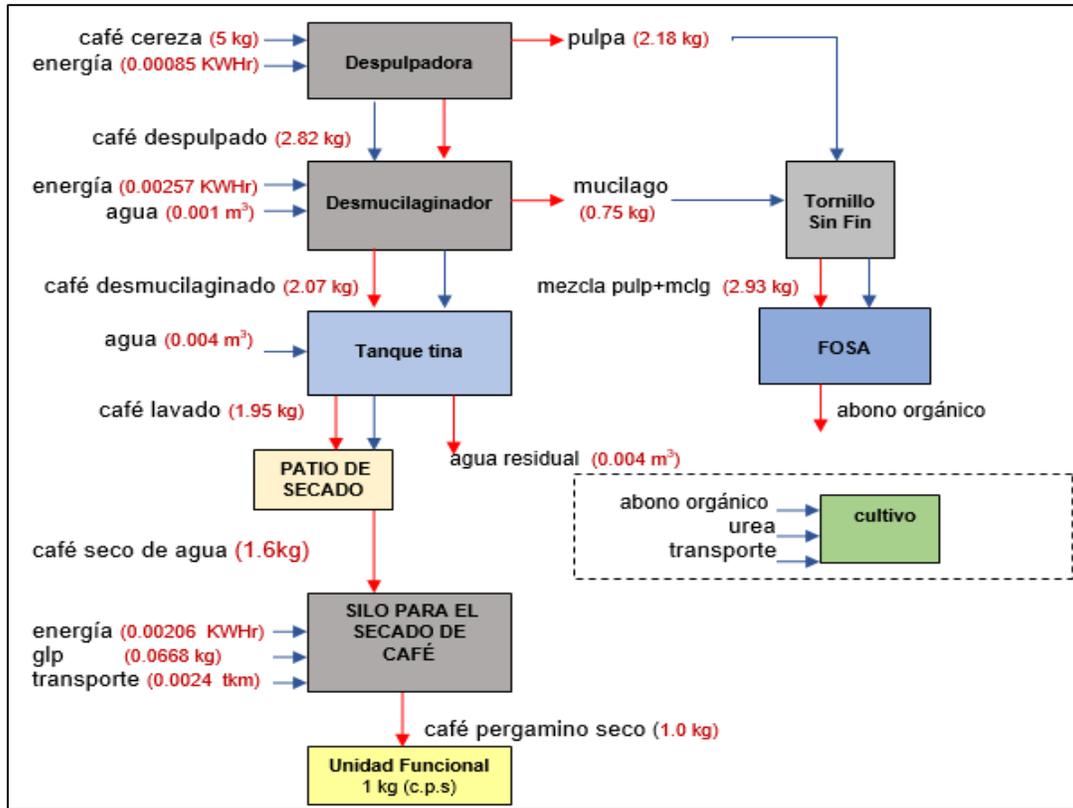


Figura 10. Balance de masa del escenario de línea base (referenciado a 1 kg cps)

Las tablas 6 y 7 relacionan los parámetros de vertimiento y emisiones de gases efecto invernadero (GEI) asociadas a los efluentes sin tratamiento, tanto en concentración como en masa, tomando como referencia un estudio previo sobre la composición fisicoquímica de estos efluentes (Matuk et al., 1997). Los valores de la tabla 7 están referidos a las concentraciones dadas en la tabla 6 y el agua de lavado en tanque tina después de los procesos de desmucilaginado y fermentación natural para la producción de 1 kg de café pergamino seco (unidad funcional).

Tabla 6.

Caracterización fisicoquímica del efluente crudo del proceso de beneficio húmedo del café

SST (g/m <sup>3</sup> )	DBO <sub>5</sub> (g/m <sup>3</sup> )	DQO (g/m <sup>3</sup> )	N-Total (g/m <sup>3</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Fosfatos (g/m <sup>3</sup> )	ALK (g CaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> )	Calcio (g/m <sup>3</sup> )	pH	Relación C/N	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente no tratado	
										N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O/g N)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )
1926.2	8351.2	14300	350.3	27.4	20.9	5700	2280	3.5	41	0,7006	357.5

\*SST: Sólidos suspendidos Totales; DBO: Demanda Biológica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno; N-Total: Nitrógeno Total; N-NH<sub>4</sub>: Nitrógeno Amoniacal; ALK :Alcalinidad Total; Ca: Calcio; pH: concentración de iones de hidrógeno; Relación C/N: Relación carbono nitrógeno.

Nota. Tomado de: Matuk et al., (1997).

Tabla 7.

*Relación masa/unidad funcional para las cargas contaminantes en el efluente crudo del proceso beneficio húmedo del café*

SST(g)	DBO <sub>5</sub> (g)	DQO (g)	N-Total (g)	N-NH <sub>4</sub> (g)	Fosfatos (g)	ALK (g CaCO <sub>3</sub> )	Calcio(g)	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente no tratado	
								N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> )
7.7	33.40	57.2	1.40	0.10	0.08	22.8	9.12	0.0028	1,43

**Nota:** Para el cálculo de las emisiones de GEI se utilizaron factores de emisión del IPCC. Para las emisiones de N<sub>2</sub>O, se utilizó el factor de emisión (0,0016 \*1.25 kg. N<sub>2</sub>O - N/kg.N) y para las emisiones de CH<sub>4</sub>, en la descarga de aguas, se utilizó el factor 0.1\* 0.25kg deCH<sub>4</sub>/kg COD.

**6.1.2 Escenario alternativo (STMA sin recobro de biogás).** La figura 11 presenta el balance de masa del escenario alternativo (aplica SMTA, pero sin recobro de biogás). Los datos relacionados en las tablas 8 y 9, muestran datos tomados de la literatura y otros extrapolados en concentración y masa, para los efluentes del SMTA. Los efluentes oscilan entre 2000 - 3500 ppm de DQO y 1200 -2200 ppm de DBO<sub>5</sub>. La figura 12 muestra el balance de masa del SMTA haciendo referencia a las aguas residuales resultantes de la producción de 1 kg de cps.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del efluente del proceso de beneficio húmedo del café a salida del SMTA (Matuk et al., 1997).

Tipo de dato	SST (g/m <sup>3</sup> )	DBO <sub>5</sub> (g/m <sup>3</sup> )	DQO (g/m <sup>3</sup> )	N-Total (g/m <sup>3</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Fosfatos (g/m <sup>3</sup> )	ALK (g CaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> )	Calcio (g/m <sup>3</sup> )	pH	C/N	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente tratado	
											N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O/g N)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )
Teórico	1715	1287.5	2646.3	479.3	299.0	24.0	3281.6	1312.6	7	6	0.96	<b>66.1</b>
Calculado	2269.9	2137.7	3539.3	376.9	235.2	18.9	3281.6	1312;6	7	9	0.75	<b>88.5</b>

\*Abreviaturas, ídem tabla 6

Tabla 9.

*Relación masa/unidad funcional para las cargas contaminantes del efluente del proceso de beneficio húmedo del café con tratamiento en el SMTA*

Tipo de dato	SST (g)	DBO <sub>5</sub> (g)	DQO (g)	N-Total (g)	N-NH <sub>4</sub> (g)	Fosfatos (g)	ALK (g CaCO <sub>3</sub> )	Calcio(g)	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente tratado	
									N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> )
Teórico	6.8	5.1	10.6	1.9	1.2	0.09	13.12	5.25	0.0038	0.26
Calculado	9.0	8.5	14.1	1.5	0.9	0.07	13.1	5;25	0.0030	0.4

\*Abreviaturas, ídem tabla 7

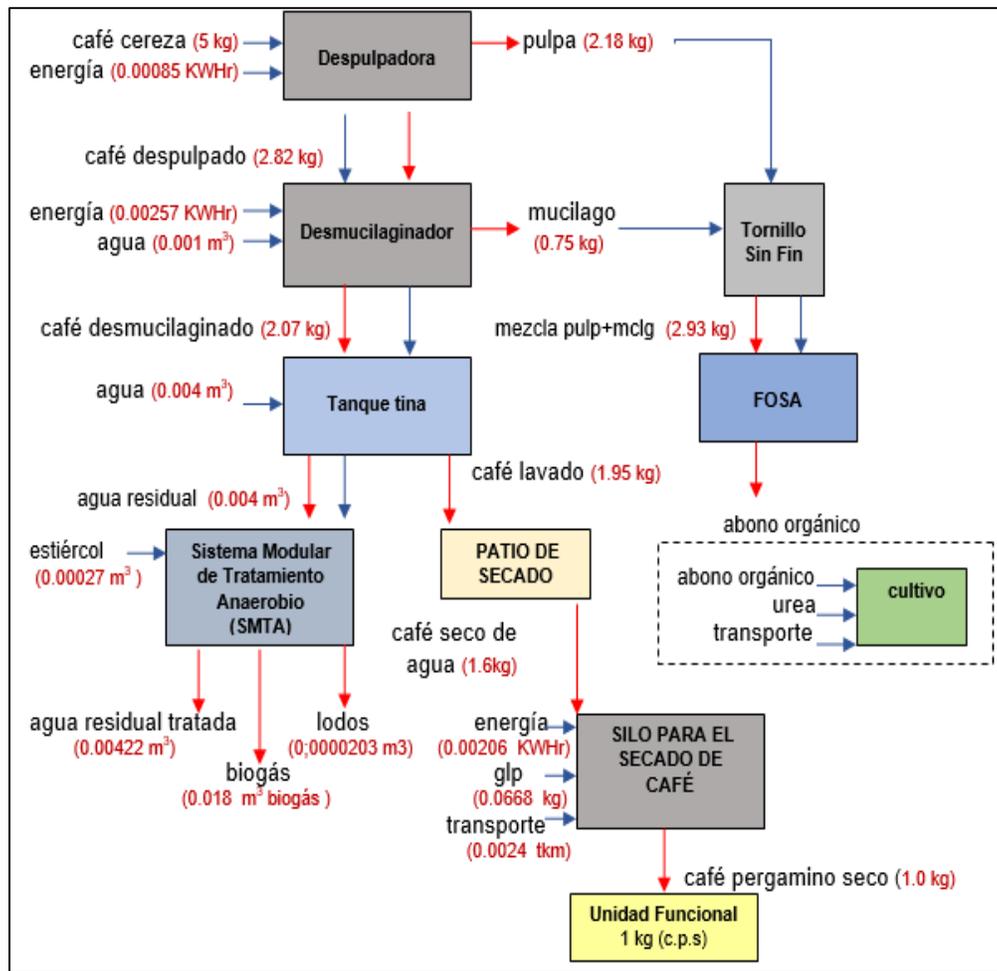


Figura 11. Balance de masa del escenario alternativo (referenciado a 1 kg cps)

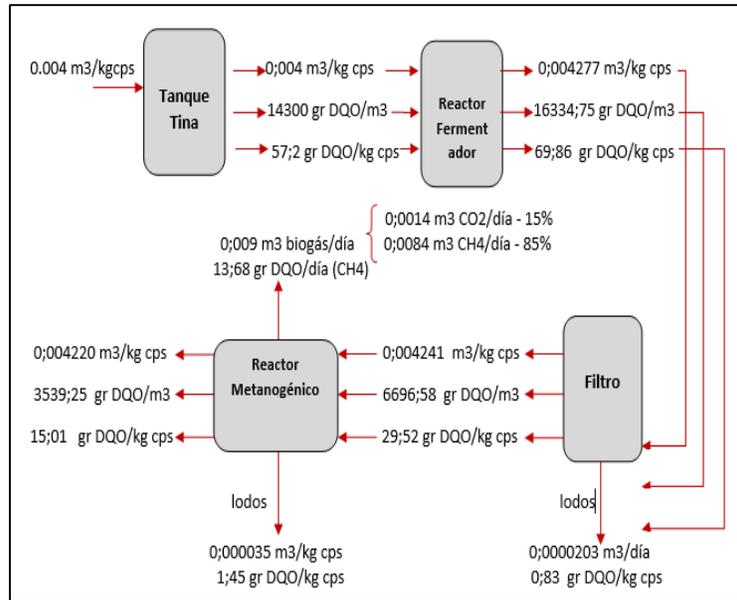


Figura 12. Representación del Balance de DQO en el SMTA

### 6.1.3 Escenario de sustitución (con SMTA y recobro de biogás)

La figura 13 presentada a continuación, resume el balance de masa del escenario de sustitución.

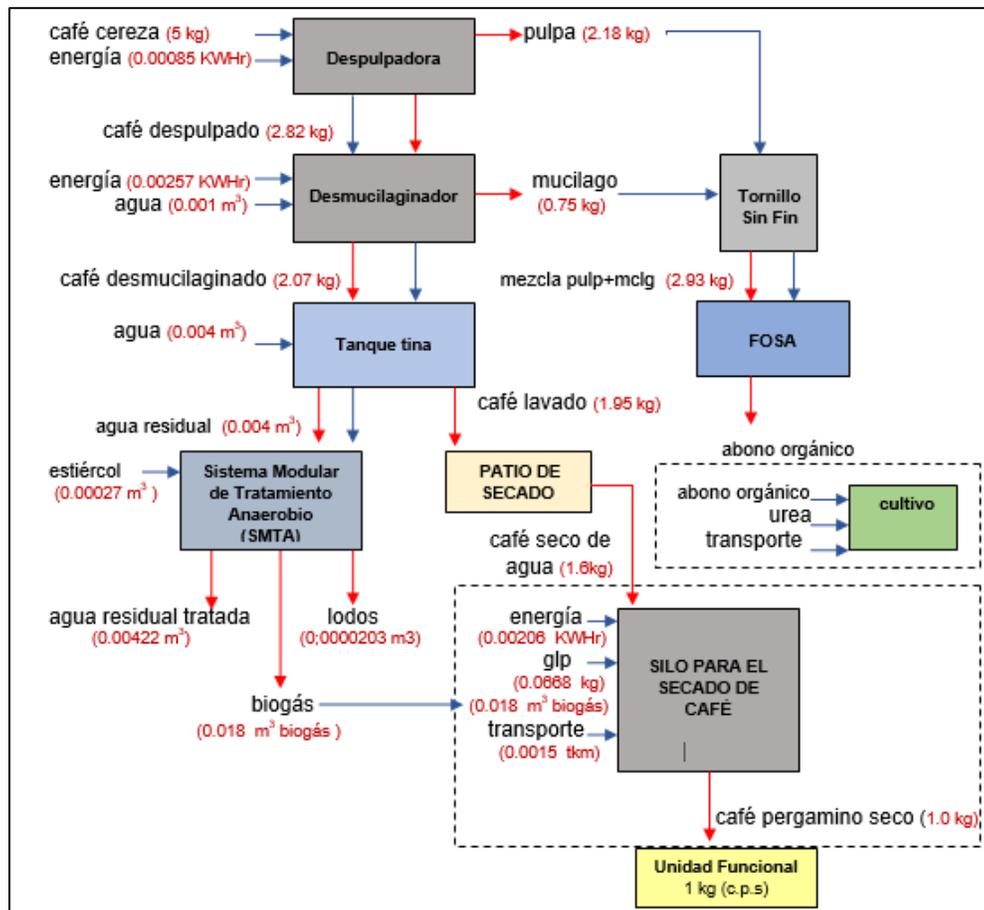


Figura 13. Balance de masa del escenario de “substitución” (referenciado a 1 kg cps)

Los datos relacionados en las tablas 10 y 11, dan cuenta de la composición de las aguas residuales del beneficio del café con y sin tratamiento. La remoción estimada de DBO<sub>5</sub> es de 74%, mientras que la concentración de Nitrógeno parece aumentar por la inoculación de estiércol en el SMTA.

Tabla 10.

*Comparación de la calidad del efluente del proceso de beneficio del café con y sin SMTA*

DATOS	SST (g/m <sup>3</sup> )	DBO <sub>5</sub> (g/m <sup>3</sup> )	DQO (g/m <sup>3</sup> )	N-Total (g/m <sup>3</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Fosfatos (g/m <sup>3</sup> )	ALK (g CaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> )	Calcio (g/m <sup>3</sup> )	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente sin y con tratamiento.	
									N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O/g N)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )
Sin tratamiento en SMTA	1926.28	8351.2	14300	350.32	27.5	20.9	5700	2280	0.7	<b>357.5</b>
Con tratamiento en SMTA	2269.91	2137.7	3539.25	376.98	235.2	18.9	3281.55	1312.62	0.75	<b>88.48</b>
<b>% remoción</b>		<b>74 %</b>	<b>75 %</b>			<b>10 %</b>	<b>42 %</b>	<b>42 %</b>		<b>75 %</b>

\*Abreviaturas, ídem tabla 6

Tabla 11.

*Comparación de la calidad del efluente del proceso de beneficio del café con y sin SMTA, en relación masa/unidad funcional.*

DATOS	SST(g)	DBO <sub>5</sub> (g)	DQO (g)	N-Total (g)	N-NH <sub>4</sub> (g)	Fosfatos (g)	ALK (g CaCO <sub>3</sub> )	Calcio (g)	Emisiones de GEI indirectas, asociadas al vertimiento del efluente sin y con tratamiento.	
									N <sub>2</sub> O (g N <sub>2</sub> O/g N)*	CH <sub>4</sub> (g CH <sub>4</sub> )
Sin tratamiento en SMTA	7.7	33	57	1.4	0.1	0.08	22.8	9.12	0.0028	1.43
Con tratamiento en SMTA	9.08	9	14	1.5	0.9	0.07	13.12	5.25	0.0030	0.4
<b>% remoción</b>		<b>74 %</b>	<b>75 %</b>			<b>9 %</b>	<b>42 %</b>	<b>42 %</b>		<b>75 %</b>

\*Abreviaturas, ídem tabla 7

De acuerdo a lo anterior, con el tratamiento de las aguas residuales en el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio SMTA, existe una remoción de DQO del orden del 75% DQO.

**6.1.4 Inventario del secado de café en silo.** En el proceso de secado del café en el silo normalmente se utiliza GLP como combustible. Para secar 1 kg de cps se necesitan 0.00668 kg de GLP (Anexo 5) el cual genera emisiones al aire representadas en la tabla 12.

Tabla 12.

*Emisiones de GLP/1 kg cps (Fuente: Propia).*

<b>Contaminante</b>	<b>100% GLP</b>
Material Particulado (kg)	0.009
SO <sub>2</sub> (kg)	0.0022
NO <sub>2</sub> (kg)	0.1689
N <sub>2</sub> O (kg)	0.0103
CO <sub>2</sub> (kg)	0.1612
CO (kg)	0.0949
Hidrocarburos no especificados, (kg)	0.0124
CH <sub>4</sub> (kg)	0.0022
Transporte(tkm)*	0.0024

Nota: Las emisiones debidas al transporte del GLP desde el casco urbano del municipio a la finca, en una distancia de 20 km, se calculan a partir del peso de GLP transportado por km en unidades de tonelada-kilómetro (tkm)

Por el contrario, en el escenario de sustitución se evalúa el impacto del desplazamiento del GLP por el biogás producido en el proceso anaerobio en el SMTA, el cual es de 0.018 m<sup>3</sup>/1 kg cps. Dado que para secar 1 kg de cps utilizando como combustible solo biogás se necesitarían 0.048 m<sup>3</sup>, la cantidad de biogás producido no es suficiente. Debido a esta situación el desplazamiento del GLP por el biogás producido para secar 1 kg de cps, solo puede ser cercano a un 37%. Como existe una disminución de la utilización del GLP en un 37%, las emisiones y el transporte de las pipetas de GLP a la finca disminuye, generando desplazamiento de las emisiones indirectas debido a transporte automotor, como lo indica la tabla 13.

Tabla 13.

*Emisiones de GLP y biogás para secar 1 kg de cps, en el escenario de sustitución*

COMPONENTE	63% GLP <sup>1</sup>	37% BIOGÁS <sup>2</sup>	TOTAL
Material Particulado (kg)	0.005625	2.31225E-06	0.00562
SO <sub>2</sub> (kg)	0.001375	7.39875E-06	0.00138
NOX (kg)	0.1055625	0.01287375	0.11843
N <sub>2</sub> O (kg)	0.0064375	3.54596E-06	0.00644
CO <sub>2</sub> (kg)	0.10075	3.08325E-07	0.10075
CO (kg)	0.0593125	3.85425E-07	0.05931
Hidrocarburos no especificados, (kg)	0.00775	3.23824E-06	0.00775
CH <sub>4</sub> (kg)	0.001375	0.43785	0.43922
Transporte (tkm)	0.0015	—-—	0.0015

1. Emisiones de GLP para secar 1 kg de cps, con un desplazamiento del 37% por el aporte del biogás.
2. Emisiones de la combustión del biogás en un 37%. (las emisiones del biogás se especifican en el anexo 5).

**6.1.5 Árboles de proceso.** Los escenarios de ciclo de vida considerados en el presente estudio, fueron programados en la herramienta especializada en ACV “Simapro”, donde el ciclo de vida se construye en la forma árbol de procesos. Los árboles de procesos de los tres escenarios evaluados se presentan en el Anexo 8.

## 6.2 Análisis de impacto ambiental potencial

Según lo establecido en el capítulo precedente, se procedió a la evaluación de los indicadores de impacto ambiental potencial de las categorías Potencial de Acidificación (AP), Potencial de

Eutrofización (EP), Respirables Inorgánicos (RESPI), Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP) y uso de energía no renovable (NRE), con el apoyo de la herramienta Simapro.

**6.2.1 Análisis de caracterización.** La figura 14 muestra el análisis de caracterización comparativo de los tres escenarios evaluados, el cual se soporta en los resultados crudos de los indicadores de categoría de impacto reportados en la tabla 14. El escenario de sustitución claramente muestra ser el de mejor desempeño ambiental en todas las categorías, mientras que el escenario alternativo genera el escenario de mayor impacto en materia de calentamiento global, producto de la implementación del SMTA, pero sin aprovechamiento del biogás allí producido. Así, se muestra como la sola implementación del SMTA para mejorar el indicador EP, de mayor incidencia sobre la calidad del recurso hídrico, no logra balancear un mejor desempeño ambiental integral.

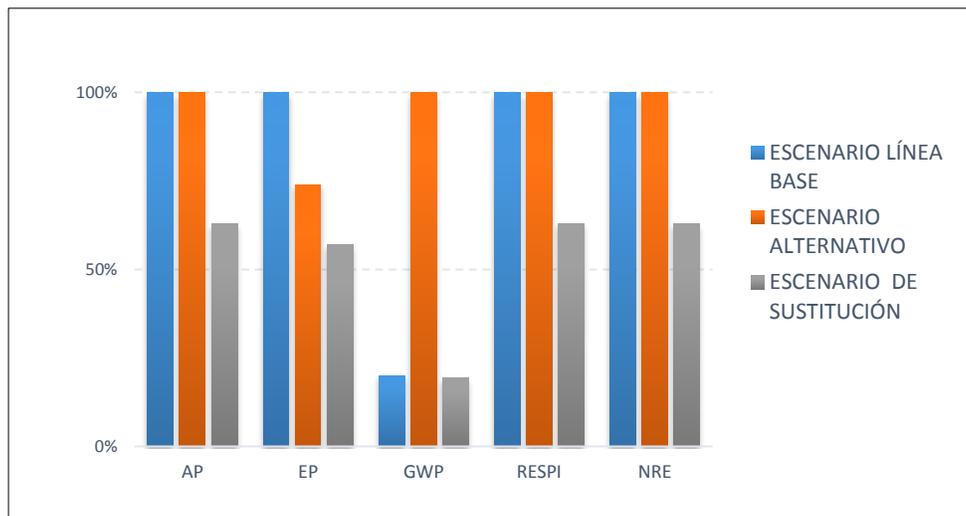


Figura 14. Análisis de caracterización comparativo para los tres escenarios ACV estudiados.

Tabla 14.

*Inventario de emisiones para los tres escenarios ACV considerados*

<b>Categorías de impacto</b>	<b>Unidad*</b>	<b>Escenario línea base</b>	<b>Escenario alternativo</b>	<b>Escenario de sustitución</b>
Potencial de Acidificación (AP)	kg SO <sub>2</sub> -eq./UF	0.00615	0.00615	0.00387
Eutrofización (EP)	kg PO <sub>4</sub> -eq./UF	0.00348	0.00256	0.00199
Poder de calentamiento Global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -eq./UF	0.0571	0.283	0.0515
Respiratorios Inorgánicos (RESPI)	kg PM <sub>2.5</sub> eq./UF	0.00154	0.00154	0.000967
Uso de energía no renovable (NRE)	MJ/UF	3.07	3.07	1.93

\*UF = 1 kg cps.

### 6.3. Análisis de contribución

Desde esta perspectiva de análisis, se propone discriminar la contribución a las categorías de impacto, por etapas o sub-procesos del ciclo de vida en cada escenario y la contribución o aporte de las emisiones relevantes en cada escenario a las categorías individualmente evaluadas (anexo 9). De esta forma, se trata de refinar la interpretación del estudio y encontrar explicaciones mejor sustentadas a los resultados de la evaluación de impacto.

**6.3.1 Potencial de acidificación.** De acuerdo a la figura 15, el Potencial de Acidificación depende fundamentalmente en todos los escenarios evaluados, del proceso de secado del grano de café en silo. La figura 16 confirma que los gases de combustión del GLP principalmente NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> son responsables de este impacto, el cual se reduce en el escenario de sustitución, donde las

emisiones de  $\text{SO}_2\text{-eq}$ , disminuyen un 37% con respecto al escenario de línea base y al alternativo debido al reemplazo parcial del GLP con el biogás.

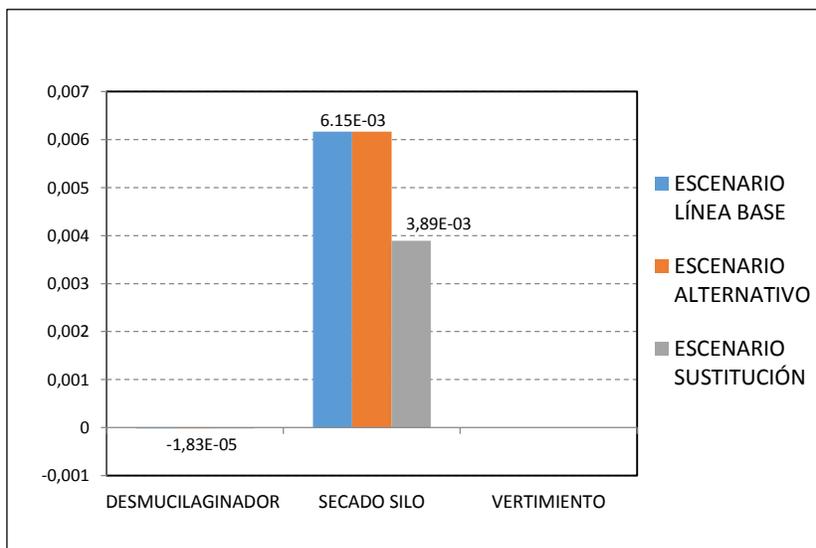


Figura 15. Análisis de contribución por procesos al Potencial de Acidificación (kg  $\text{SO}_2\text{-eq/kg cps}$ ) (CML2001)

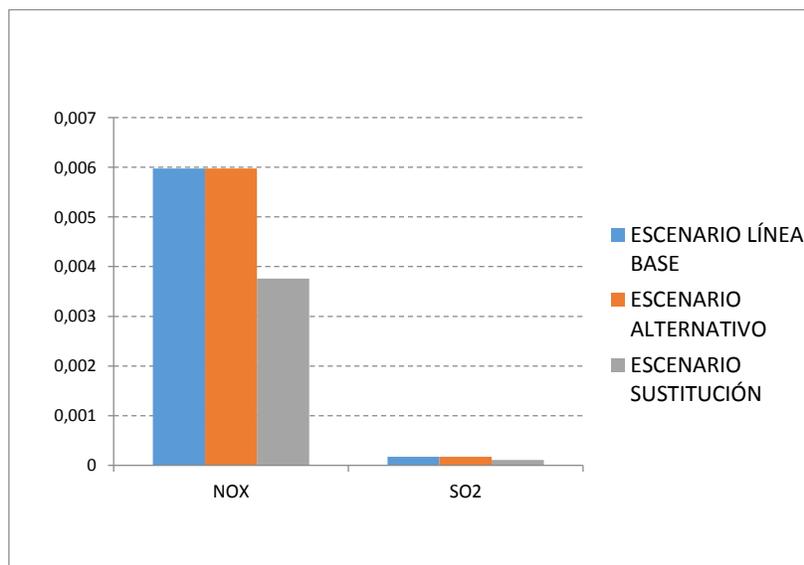


Figura 16. Análisis de contribución por carga contaminante al Potencial de Acidificación (kg  $\text{SO}_2\text{-eq/kg cps}$ ) (CML2001)

**6.3.2 Potencial de eutrofización.** Según la figura 17, las principales contribuciones al Potencial de Eutrofización se presentan en los sub-procesos “silo de café” y “vertimiento”, en este último siendo mitigado por el uso del SMTA en los escenarios alternativo y de sustitución, donde esta carga se reduce hasta 0.000101 kg. PO<sub>4</sub>-eq/kg cps. Por otra parte, y con base en la figura 18, la disminución en las descargas de materia orgánica (DQO) y fosfatos producidas por el SMTA, son suficientes para reducir este indicador y compensar el poco efecto del SMTA sobre la descarga de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno parecen realizar un aporte importante al potencial de eutrofización, pues su reducción en el escenario de sustitución respecto a los otros escenarios muestra ser importante en el cálculo de esta categoría.

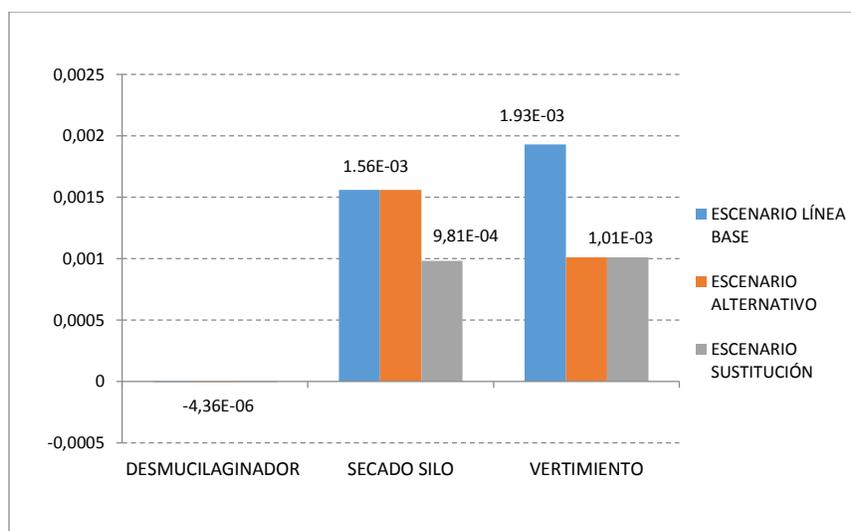


Figura 17. Análisis de contribución por procesos al Potencial de Eutrofización (kg. PO<sub>4</sub>-eq/kg cps) (CML2001).

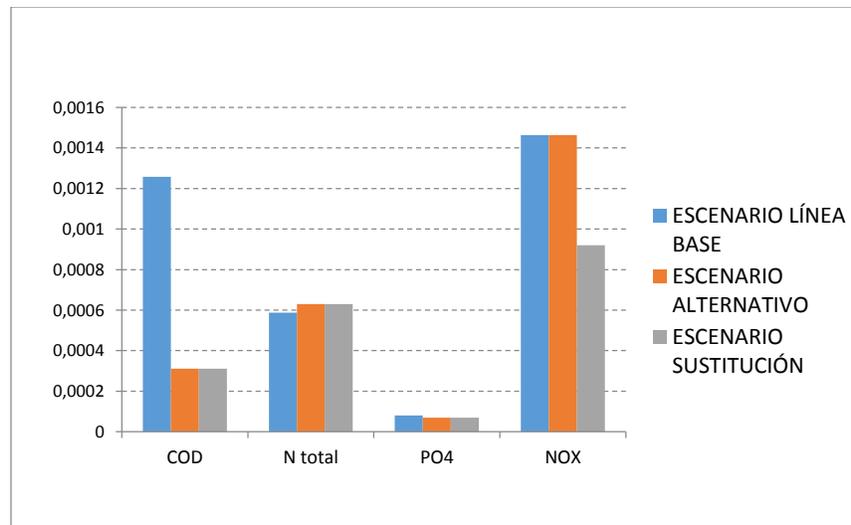


Figura 18. Análisis de contribución por carga contaminante al Potencial de Eutrofización (kg. PO4-eq/kg cps) (CML2001).

**6.3.3 Poder de calentamiento global.** La figura 19, revela como el secado de café en silo y el vertimiento son los procesos que más aportan a la categoría de calentamiento global. Esta carga ambiental, disminuye con el reemplazo parcial del GLP con biogás del STMA y particularmente disminuye sensiblemente con la implementación del STMA acoplado al recobro y uso del biogás. El proceso de desmucilaginado no aporta a esta categoría, por el contrario, en este sub-proceso, se puede observar alguna contribución favorable (valor negativo) atribuible al recobro de la pulpa y su uso como reemplazo de fertilizantes inorgánicos.

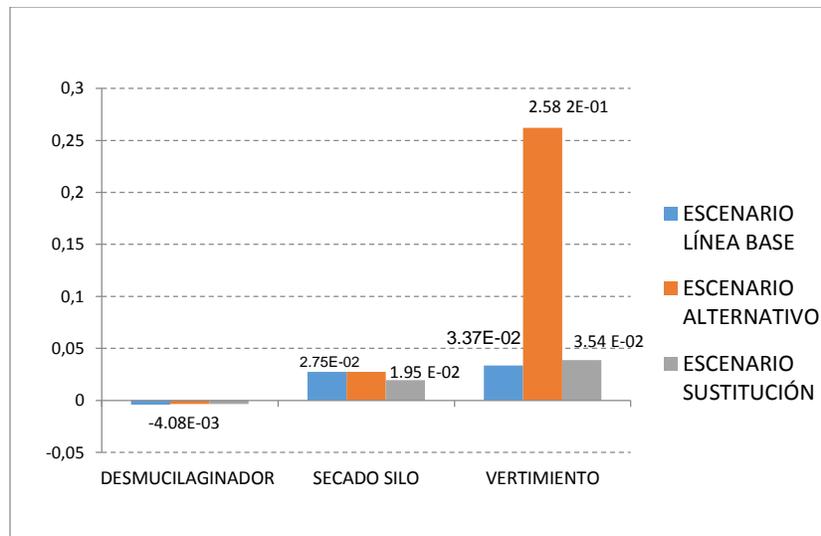


Figura 19. Análisis de contribución por procesos al Poder de Calentamiento Global kg. CO<sub>2</sub>-eq/kg cps (IPCC100a).

Así mismo, la figura 20 muestra como el aporte principal a esta categoría proviene de emisiones directas e indirectas de metano, las primeras cuando no se aprovecha el biogás producido en el SMTA (escenario alternativo) y las segundas debidas a la degradación indirecta de la materia orgánica en el cuerpo de agua receptor, como ocurre principalmente en el escenario de línea base. Otro aporte importante proviene de emisiones combustibles de CO<sub>2</sub>, asociado al uso del GLP y al transporte de las pipetas en vehículo diesel hasta el sitio del caso de estudio. En efecto este aporte disminuye en el escenario de sustitución con el desplazamiento parcial de GLP con el biogás del STMA

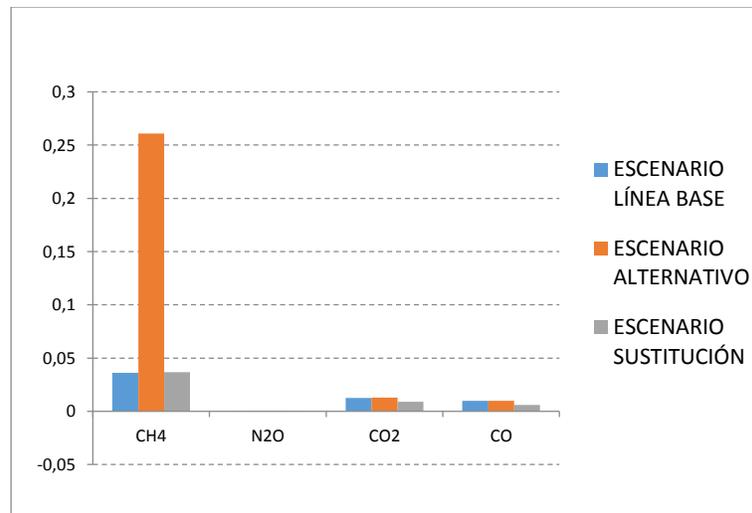


Figura 20. Análisis de contribución por contaminantes al Poder de Calentamiento Global kg. CO<sub>2</sub>-eq/kg cps (IPCC100a).

**6.3.4 Categoría respiratorios inorgánicos.** La figura 24 muestra como esta categoría es exclusivamente promovida por el proceso secado de café en silo y disminuye en el escenario de sustitución a un valor de 0.00967 kg de PM<sub>2.5</sub>-eq./kg cps, como resultado del desplazamiento de GLP por biogás. De manera similar a lo ocurrido en la categoría de potencial de acidificación, nuevamente los NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> son los principales aportantes a la categoría RESPI, seguramente promotores de material particulado (PM<sub>2.5</sub>-eq).

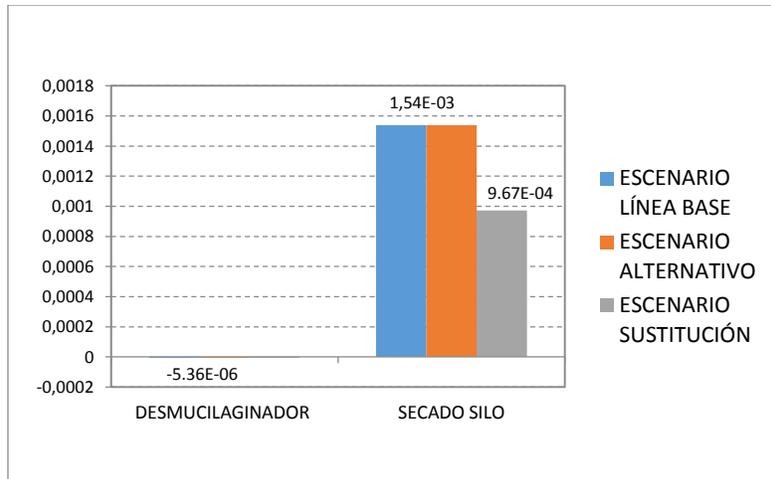


Figura 21. Análisis de contribución por procesos a la categoría de impacto Respiratorios Inorgánicos(kg PM<sub>2.5</sub> eq /kg cps) (Impact 2002+).

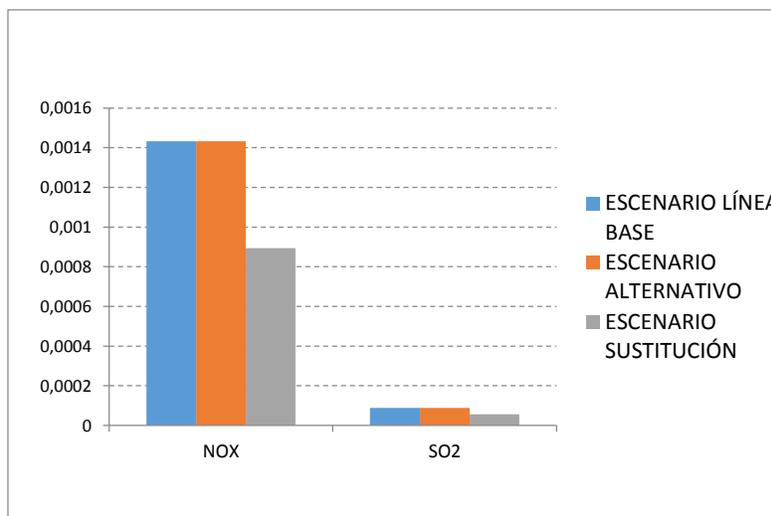


Figura 22. Análisis de contribución por carga contaminante a la categoría de impacto Respiratorios Inorgánicos(kg PM<sub>2.5</sub> eq /kg cps) (Impact 2002+).

**6.3.5 Uso de energía no renovable.** En la figura 23, muestra claramente como el proceso desmucilaginado al utilizar energía de la matriz eléctrica colombiana, fundamentalmente de tipo hidroeléctrico hace una contribución negativa a la categoría uso de energía no renovable, en tanto que solo en el proceso de secado aparece, por efecto del transporte de las pipetas de GLP y el uso

del GLP, una contribución importante de energía fósil o no renovable. En los escenarios de línea base y alternativo esta carga ambiental es de 3.12 MJ y en el escenario de sustitución disminuye a 1.97 MJ, como resultado del desplazamiento parcial del GLP por biogás.

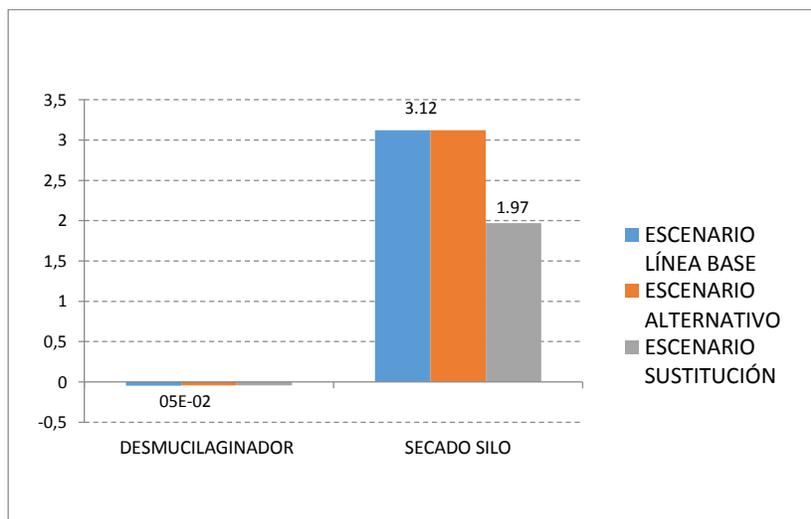


Figura 23. Análisis de contribución por procesos a la categoría de impacto Uso de Energía no Renovable (MJ/kg cps) (Impact2002+)

## 8. Interpretación y conclusiones del ACV

En relación a los resultados del análisis de caracterización, el Impacto Ambiental Potencial del proceso de Beneficio Ecológico del café para la producción de 1 kg de cps, esta acentuado en el escenario de línea base, en las categorías Potencial de Acidificación, Potencial de Eutrofización, Respiratorios Inorgánicos y Uso de Energía No Renovable con un aporte del 100%. En la categoría

Poder de Calentamiento Global el impacto no es representativo en el escenario de línea base, con un aporte del 20%.

El escenario alternativo del tratamiento de las aguas residuales del café en el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), genera beneficios ambientales en la categoría Potencial de Eutrofización, con una reducción del impacto en un 26% con respecto al escenario sin tratamiento del efluente. En la categoría Poder de Calentamiento Global el impacto aumenta en este escenario debido a que el biogás producido en el tratamiento se está emitiendo a la atmosfera como GEI. En las categorías Potencial de Acidificación, Respiratorios Inorgánicos y Uso de Energía No Renovable no se presentan reducciones del impacto con respecto al escenario de línea base.

El enfoque consecuencial de la inclusión de un tercer escenario con aprovechamiento del biogás generado en el tratamiento de las aguas residuales del café, reduce el Impacto Ambiental Potencial en todas las categorías de impacto evaluadas principalmente en la categoría de Potencial de Eutrofización con una reducción del 43% con respecto al escenario de línea base, seguido por el Potencial de Acidificación, Uso de Energía no Renovable y Respiratorios inorgánicos en un 37%. En el Potencial de Calentamiento Global, la reducción es de un 81%, con respecto al escenario alternativo pero no es significativa con respecto al escenario de línea base, debido a que el impacto en esta categoría está representado principalmente en la producción de metano sin aprovechamiento.

Con respecto al análisis de contribución, las principales etapas que aportan al impacto ambiental son el secado en el silo de café, por el uso del GLP, debido a las emisiones de NO<sub>x</sub> principalmente y el subproceso del vertimiento por la carga orgánica contaminante. En la etapa de desmucilagador la carga ambiental es mínima y se reclaman beneficios ambientales por el uso

de la pulpa de café como abono orgánico, disminuyendo el uso de fertilizantes inorgánicos y el transporte a la finca cafetera mejorando el desempeño ambiental del proceso de beneficio del café

En la etapa de secado del café en el silo, el impacto ambiental está marcado en todas las categorías evaluadas principalmente en el Potencial de Acidificación, Respiratorios Inorgánicos y Energía no renovable, donde no se presentan diferencias significativas en ningún escenario. En la categoría Potencial de Eutrofización el impacto ambiental del silo aumenta en el escenario alternativo de 45% a 61% y disminuye en el escenario de sustitución a 49%. En la categoría Poder de Calentamiento Global el impacto ambiental del silo disminuye en el escenario alternativo de 45% a 10% y aumenta en el escenario de sustitución a 33%.

En la etapa de vertimiento, el impacto ambiental está dirigido a las categorías Potencial de Eutrofización y Poder de Calentamiento Global. En EP el impacto ambiental del vertimiento disminuye en el escenario alternativo de 55% a 39% con respecto al escenario de línea base y aumenta en el escenario de sustitución a 59%. En GWP el impacto ambiental del vertimiento aumenta en el escenario alternativo de 55% a 90% con respecto al escenario de línea base y disminuye en el escenario de sustitución a 66%. El parámetro DQO disminuye un 24% y los fosfatos un 13% con respecto al escenario de línea base y el nitrógeno total aumenta en un 7%, debido a la inoculación de estiércol en el sistema de tratamiento para mejorar el proceso de metanogénesis para la producción de biogás. El vertimiento no aporta carga ambiental a las categorías de impacto de Potencial de Acidificación, Respiratorios Inorgánicos y Uso de Energía no Renovable.

La inclusión de un escenario prospectivo en el proceso de beneficio del café, donde se acoplan los subprocesos del desmucilagador- tratamiento de aguas residuales en el SMTA y secado del café en el silo con aprovechamiento del biogás generado, se convierte en un sistema multifuncional

compatible, donde se reduce el impacto ambiental en los indicadores de las cinco categorías evaluadas, donde los residuos del proceso considerados como problemática, son potenciales en generar ganancias ambientales.

El enfoque consecuencial del análisis de ciclo de vida por el desplazamiento porcentual de funciones energéticas no renovables por el biogás producido en el SMTA en un 37% en el escenario de sustitución, reclama beneficios ambientales por la disminución de las emisiones de GEI del GLP y la reducción de los impactos asociados al transporte de los insumos.

El recobro de biogás es una opción favorable ambientalmente donde las emisiones generadas en el tratamiento son aprovechadas energéticamente mejorando el perfil ambiental del proceso de Beneficio Ecológico del café.

## **9. Recomendaciones.**

El sector cafetero debe seguir investigando, desarrollando e implementando estrategias de mitigación de impactos ambientales, donde los residuos generados en el proceso de beneficio del café sean aprovechados generando sostenibilidad ambiental y ahorro al caficultor en el transporte de insumos a la finca cafetera.

El Centro de Investigaciones del Café (Cenicafé) debe concentrar esfuerzos en la investigación experimental para el mejoramiento del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), para la captura del biogás generado y adecuación del diseño de silo para el aprovechamiento de esta fuente de energía renovable, que permita suplir un porcentaje de la demanda de insumos para el

secado del café en época de cosecha. De la misma forma garantizar una carga orgánica constante en el sistema, con una mejora en la relación C/N, para generar un flujo de concentración de DQO removida que genere la cantidad de biogás necesario para el proceso de secado en época de cosecha evitando defectos que afectan la calidad final del producto.

### Referencias Bibliográficas

- Adams, M., A., Ghaly A., E., (2007). The foundations of a multi-criteria evaluation methodology for assessing sustainability. 2009. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 14:5, 437-449.
- Arias, H., J.J.; Riaño H., N.M.; Aristizábal I., M. (2013) Balance de Energía basado en la contabilidad del carbono en tres sistemas productivos cafeteros. *Revista Cenicafé* 64(2): 7-16.
- Café de Colombia. (s.f.) Sitio Web Recuperado de: <http://www.cafedecolombia.com>  
[www.federaciondefcafeteros.org](http://www.federaciondefcafeteros.org).
- Cárdenas, A., J., Vásquez I., J. (2013) Análisis del Ciclo de Vida del procesamiento y la distribución del café del beneficio ecológico en la Finca Juancito y convencional en la Finca la Montaña. Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para la obtención del título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo. Honduras..
- Chacón, J. (2008) Historia ampliada y comentada del Análisis de Ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. N° 72, Octubre-Diciembre.
- Contreras, A., M., Maylier, P., E., R., Langenhove, H., V.; Dewulf, J., (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* (17) 772–779.
- Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, Cenicafé. (1988) Tecnología del cultivo del café. Manizales, Caldas. 404p.
- Díaz, P., R., Ballesteros, M. (2006) Evaluación del Ciclo de Vida aplicada en Agrociudades Productivas: Un instrumento de gestión ambiental para el diseño de políticas. Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible (CINPE), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

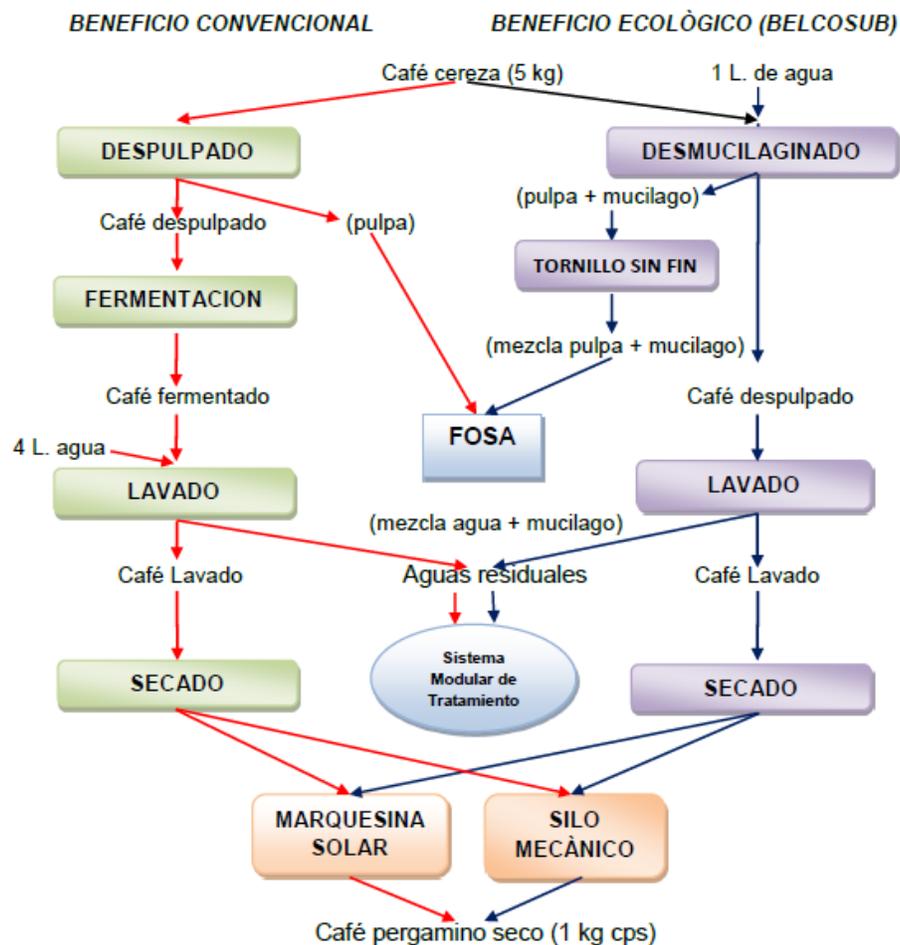
- Ekvall, T., Assefa, G., Bjōrklund, A., Eriksson, O., Finnveden, G., (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management* (27), 989–996.
- FEDECAFE. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2013) *Manual del Cafetero Colombiano. Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura*. Chinchiná, CENICAFÉ, Tomo 3. 327 p.
- Finnveden, G., Hauschild, M., Z., Ekvall, T., Guine'e, 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.
- Flórez, R., C. P.; Arias S., J., C.; Maldonado L., C. E.; Cortina G., H.; Moncada B., M., P.; Quiroga Cardona J.; Molina V., D., M.; García., J., C.; Duque O., H.; (2018) *Variedades. Castillo Zonales. Resistencia a la roya con mayor productividad*. Chinchina, Cenicafé, 8 p. (Avances Técnicos n°489).
- Gutiérrez F., J.M. (2011) *Desarrollo de un secador mecánico de café con empleo de alcohol carburante obtenido del proceso de beneficio húmedo*. Chinchina: Cenicafé. 44 p.
- Icontec y Aene Consultoría S.A. (Marzo de 2003) *Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicaciones de Energías Alternativas-Guía para la implementación de Sistemas de Producción de Biogás*. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME: Santa Fe de Bogotá
- International Organisation for Standardisation ISO (2006) *ISO 14040. Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Principios y Marco de Referencia*. Versión oficial en español de la norma Europea.. *Internacional Standard*. Madrid
- MADS. (2015). Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015: “Parámetros y valores límite máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y en los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) de la República de Colombia: Bogotá. p. 62.
- Meneses-Jácome, A., et al., (2016). Sustainable energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, 1249-1262.

- Meneses-Jácome, A. et al. (2015). LCA applied to elucidate opportunities for biogas from wastewaters in Colombia. *Water Science and Technology* 71(2), 211-219.
- Montilla, P., J.; Arcila P., J.; Aristizábal L., M.; Montoya R., E.; Puerta, Q., G.; Oliveros, T., C.; Cadena, G., Gabriel. (2008) Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de Beneficio. Chinchina, Cenicafé, 7 p. (Avances Técnicos n°370).
- Moller, J., Boldrin, A & Christensen, T.H. (2009). Anaero biddigestion and digestate use: Accounting of greenhouse gases and global warming contribution. Department of Environmental Engineering Technical University of Denmark Kgs.Lynby, Denmark
- Oliveros, T., C. E.; Sanz U., J., R.; Ramírez G., C. A.; Tibaduiza V., C.A.; (2013) ECOMIL. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Chinchina, Cenicafé, 8p. (Avances Técnicos n°432).
- Orozco, R., P.A.. (2003) Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. (Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química). Cenicafé. Disciplina de Química Industrial.. 93. p.
- Pabón, U., J., P.; Sanz, U., J., R.; Oliveros., T., C., E.; (2009) Manejo del café desmucilaginado mecánicamente. Avance Técnico 388. Chinchiná. Cenicafé. 8 p.
- Papong S., Rotwiroo, P., Chatchupong, T., Malakul, P., (2014). Life cycle energy and environmental assessment of bio-cng utilization from cassava starch wastewater treatment plants in Thailand. *Renewable Energy* (65) 64-69.
- Parra C., A; Roa M., G.; Oliveros, T., C.E. (2008) Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. *Revista Brasileira de Ingeniería Agrícola y Ambiental*. vol. 12. n°4: 428-434.
- Parra C., A; Roa M., G.; Oliveros, T., C.E; Sanz U., J., R. (2017) Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino. Chinchina, Cenicafé, 78 p.
- Puerta, Q., G.; (2000) Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. Chinchina, Cenicafé, 7 p. (Avances Técnicos n°276).

- Ramírez G., C.A.; Oliveros T., C.E.; Sanz U., J.R. (2015) Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. *Revista Cenicafé* 66(1): 46-60.
- Matuk V., V; Puerta Q., Rodríguez, V., N.; (1997) Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café. *Cenicafé* 48(4): 234-252-
- Rodríguez, V., N.; (2009) Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Universidad Politécnica de Valencia. 552 p.
- Rodríguez, V., N.; Zambrano, F., D.; (2010) Los Subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Chinchina, Cenicafé*, 8 p. (Avances Técnicos n°393).
- Rodríguez, V., N.; Sanz, U., J.; Oliveros, T., C.; Ramírez, G., C.; (2015) Beneficio del café en Colombia. Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. *Chinchina, Cenicafé*, 37 p.
- Suárez Ávila, Z. A.; Mejía Cristancho, A. P. y Quintero Rincón, M. J. (2016) Estudio Exploratorio de La Digestión Anaerobia Como Alternativa Técnica-Ambiental para la gestión y tratamiento de los Efluentes del Beneficio del Café en Colombia. Trabajo de grado en ingeniería ambiental, Unidades tecnológicas de Santander, Bucaramanga
- Zambrano, F., D.A., Izasa, J.D.; Rodríguez, V., N. (1999) Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del lavado del café. *Boletín técnico N°20*. Centro Nacional de Investigaciones del café, *Cenicafé*. Chinchiná. *Cenicafé*.
- Zambrano, F., D.A.; Rodríguez, V., N; López, P., U.; Orozco, R., P.A.; Zambrano, G., A.J.; (2006) Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. *Boletín técnico N°29*. Centro Nacional de Investigaciones del café, *Cenicafé*. Chinchiná. *Cenicafé*.,
- Zambrano, F., D., A.; Rodríguez V., N; López, P., U.; Zambrano G., A., J. (2010) Los Subproductos del Café. Fuentes de Energía Renovable. *Avance Técnico 393*. Chinchiná. *Cenicafé*. 7 p.

## Apéndices

**Apéndice A.. Proceso de beneficio ecológico convencional y proceso de beneficio ecológico con manejo de subproductos.**



*Figura 1-1.* Descripción y comparación proceso de beneficio ecológico convencional y proceso de beneficio ecológico con manejo de subproductos.

**Apéndice B. Capacidad desmucilaginosos y silos de café.**Tabla 2-1. *Especificaciones Técnicas de Desmucilaginosos.*

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	CAPACIDAD DESMUCILAGINADOR					
	300	600	1000	2000	3000	5000
Rango de producción (@ cps/año) *	1000 a 1500	1501 a 3000	3001 a 5000	5001 a 700	7001 a 9000	Mayor a 9000
Despulpadora	Nº3	Nº3- 1/2	Nº4-1/2	1 Nº8	2 Nº8	2 Nº300 K
Motor Eléctrico HP	1/2 HP	3/4 HP	1 HP monofásico	2 HP	3 HP	5 HP
Desmucilaginoso motor eléctrico HP	2 HP	2 HP	3 HP	5 HP	7,5 HP	12 HP
Motor Diesel	6 HP	6 HP	9 HP	9 HP - 15 HP	15 HP - 25 HP	15 HP - 36 HP
Consumo de agua L/min	0,8	1,6	2,7	6	9,00	9,00

\*Valores obtenidos considerando días pico de 2,0 y 2,5 %, seis horas de operación en el día pico y conversión cereza a pico 5,0

Tabla 2- 2. *Especificaciones Técnicas Silos mecánicos.*

CARACTERÍSTICAS				
CAPACIDAD @ cps	Kg. café húmedo	Kg. café seco	Motor Eléctrico	Motor Diésel
40	1000	500	1	3
50	1250	625	2	6
70	1750	875	3	9
80	2000	1000	3	9

---

<b>CARACTERISTICAS</b>				
<b>CAPACIDAD @</b>	<b>Kg. café</b>	<b>Kg. café</b>	<b>Motor</b>	<b>Motor</b>
<b>cps</b>	<b>húmedo</b>	<b>seco</b>	<b>Eléctrico</b>	<b>Diésel</b>
<b>100</b>	2500	1250	3	9
<b>120</b>	3000	1500	4	12
<b>160</b>	4000	2000	5	15
<b>200</b>	5000	2500	7,5	22,5
<b>300</b>	7500	3750	10	30
<b>440</b>	11000	5500	15	45

---

## Apéndice C. Componentes del sistema modular de tratamiento anaerobio SMTA.

### 3.1. TRAMPA DE PULPAS.

El agua residual generada en la etapa de lavado se debe conducir a una trampa de pulpas. La salida de aguas mieles de la trampa al primer tanque o reactor hidrolítico se ubica a 10 cm del fondo de la trampa de pulpas, y el rebose de seguridad por debajo de la entrada de aguas mieles y drenados de la pulpa, en caso de que ocurra un taponamiento del dispositivo de salida a los reactores hidrolíticos, por la presencia de la pulpa, de gases o aire en la tubería que conecta la trampa de pulpas con el reactor hidrolítico. La descarga del rebose de seguridad se conduce mediante manguera de polietileno de 1<sup>1/2</sup> a una excavación de 1 x 1 x 1, la cual se llena con tallos provenientes del zoque del café.



Figura 3- 1. trampa de pulpas: a. polietileno b. mampostería



Figura 3- 2. Excavación para rebose

### 3.2. REACTORES HIDROLITICOS-ACIDOGENICOS.

Las aguas residuales entran al reactor hidrolítico-acidogénico (RHA), por el fondo y salen a través de un dispositivo de 52 cm de altura total, con una perforación de 3/8" en la parte superior que evita que se suspenda eventualmente el flujo líquido por acumulación de gas. Además de la posibilidad de almacenar agua residual del lavado por encima del nivel de salida (>52 cm), durante la mayor parte del año queda establecido como mínimo un tiempo de retención hidráulico de dos días, por debajo del nivel de operación del líquido, buscando la máxima formación de ácidos posibles en esta etapa, para favorecer posteriormente las reacciones que hace parte de la metanogénesis.

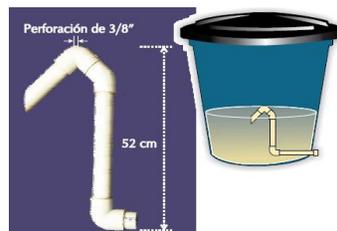


Figura 3 - 3. Reactor hidrolítico-acidogénico (RHA), conector



*Figura 3- 4* tubería de seguridad para rebose de fondos y descarga de lodos

### 3.3. RECAMARAS DOSIFICADORAS (RD).

El sistema de dosificación de las aguas residuales del lavado de café por gravedad, se estudió mediante el acondicionamiento de un tanque de polietileno de 250 litros, altura 65 cm. Dentro del mismo se estableció un flujo constante mediante el uso de una válvula de flotador y orificios de diámetro predeterminado practicado en las tuberías de salida, que permiten garantizar un caudal uniforme a través de una cabeza hidrostática permanente.

En el fondo se instaló un marco colector de 50.5 x 35.5 cm, fabricado en tubería de pvc, el cual va acoplado al tubo de salida del tanque (figura x). Este tubo de salida (e) está provisto con dos tapones de pvc con un orificio de 5/64", que permite la salida del líquido por gravedad con un caudal previamente ajustado a 550 ml/min por tapón correspondiente a cada RM. En todos los lados del marco colector se hacen orificios inferiores de 5/32", espaciados a una distancia de 1 cm, que permiten la salida del líquido por el fondo del tanque<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Se recomienda instalar una recámara dosificadora de 250 litros por cada 5 reactores metanogénicos de 2 m<sup>3</sup>



Figura 3-5 . Recamara de dosificación en polietileno de 250 litros de capacidad.

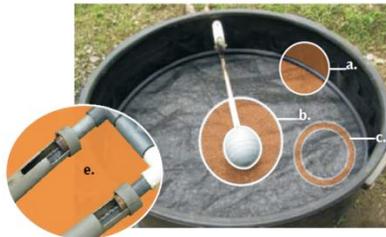


Figura 3 -6 . a. aro en manguera, b. válvula flotadora. c. malla mosquitera, tapones reguladores de caudal. e



Figura 3-7. marco colector de líquido hacia RM

### 3.4. REACTORES METANOGENICOS RM.

Los reactores metanogénicos están constituidos por filtros anaeróbicos de flujo ascendente empacados al azar con relleno inerte reciclado de botellas plásticas o guadua, utilizadas como soporte para los microorganismos. Son tanques en polietileno negro de 2 m<sup>3</sup> que permite que se

alcancen temperaturas promedio en el día de 24 y 26°C. La tubería de entrada del agua residual al reactor, está provista de una "T" con un tramo de tubería y tapón roscado lo que permite el mantenimiento en caso de obstrucción.

Antes de la entrada a los reactores y sobre la "T", que comunica el tapon roscado y la tubería de acceso de agua residual, se instala un disco perforado con 38 orificios de 7/32" (figura x). Internamente en el reactor, la entrada del agua residual se realiza en el fondo por medio de un dispositivo cuadrado de 45 cm por cada lado en el centro con perforaciones de 7/32" (figura x).

La salida del efluente se realiza en forma axial, utilizando una tubería de pvc de 1.5" y 20 cm con un corte transversal de 45°, conectado por medio de un semicodo a una tubería de 50 cm que comunica con el exterior.



Figura 3-7 . Disco perforado para prevenir el paso de insolubles

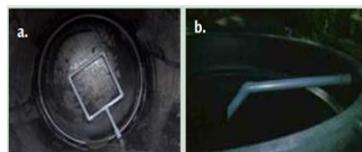


Figura 3 -8. a. Dispositivo de entrada y b. salida del reactor metanogénico

La etapa de arranque tiene como propósito permitir el crecimiento y la adaptación de los microorganismos metanogénicos a las aguas mieles del café sin necesidad de neutralizarlas. Este proceso tiene una duración de 10 semanas (libro). De esta forma los reactores quedan inoculados

con una proporción aproximada de 2 kg de sólidos suspendidos volátiles por m<sup>3</sup> de reactor y una relación cercana a 1.33 g de DQO de sólidos suspendidos volátiles.



*Figura 3 -9 .Reactor inoculado*

### **3.5 TAMAÑO DEL SMTA.**

El tamaño del SMTA se determina con la cantidad de café cereza recolectado en el día de máximo de producción. Para que el sistema funcione correctamente es necesario que el café procedente del proceso de fermentación del mucílago, se lave en el tanque de fermentación con un consumo de agua entre 4.0 y 5.0 L.kg<sup>-1</sup>c.p.s, para evitar bajo rendimiento o sobrecargas del sistema. Cenicafé investigo 9 modelo, los cuales según el caudal de agua residual necesita determinada capacidad:

Tabla 3-1. *Prototipos de SMTA y estimativo de capacidad de los tanques para fermentar y lavar, de acuerdo con la cantidad máxima de café en cereza beneficiado en un día.*

<b>MODELO SMTA</b>	<b>kg café cereza por día</b>	<b>Volumen estimado para lavado (L)*</b>	<b>tanque hidrolítico acido génico</b>	<b>tanque metano génico</b>	<b>capacidad tanque metano génico</b>
SMTA 70	72	75	1	1	250
SMTA 120	126	131	1	1	500
SMTA 180	188	187	1	1	750
SMTA 300	313	325	2	1	750
SMTA 400	417	433	3	1	1000
SMTA 600	625	649	3	2	750
SMTA 800	833	864	3	1	1000
SMTA 1100	1110	1152	2	2	2000
SMTA 1700	1710	1774	3	2	2000

\*El 70% del volumen corresponde al ocupado por el café en baba y el 30% restante al volumen libre para hacer el lavado.

## Apéndice D. Inventario proceso BECOLSUB

Tabla 4-1. Inventario Despulpadora-Desmucilaginador-Tanque Tina

Proceso	Etapas	Descripción	Cantidad	Unidad	Entrada	Salida
<b>PROCESO BECOLSUB</b>	<b>Despulpadora</b>	Capacidad Despulpadora	1000	Kg/hr	X	
		1 Café cereza	5	kg	X	
		2* Energía motor despulpadora	0.00085	KWHr	X	
		Pulpa	2.18	kg		X
		Café despulpado con mucilago	2.82	kg		X
	<b>Desmucilaginador</b>	Capacidad Desmucilaginador	1000	Kg/hr	X	
		Café despulpado con mucilago	2.82	kg	X	
		2*Energía motor desmucilaginador	0.00257	KWHr	X	
		agua, desmucilaginador	0;001	m3	X	
		Mucilago	0.75	kg		X
		café desmucilaginado	2.07	kg		X
		café desmucilaginado	2.07	kg	X	
		agua, tanque tina	0;004	m3	X	
	<b>Tanque tina</b>	agua residual, tanque tina	0;004	m3		X
		café lavado	1.95	kg		X

**1. Relación cereza a pergamino:** Cantidad de café cereza requerido para obtener 1 kg de café pergamino seco (c.p.s.) tipo Federación.

2. La energía reportada son valores de la finca del motor de la despulpadora (1 HP) y el motor del desmucilagador (3 HP), calculando el tiempo de operación.- El valor reportado de la electricidad esta incrementado en un 15%, por las pérdidas de transmisión en el sistema eléctrico Colombiano.

3. Para complementar los datos, se utilizaron los factores de conversión registrados en el avance técnico 370.

Tabla 4- 2. *Inventario tornillo sin fin - fosa de pulpa.*

Proceso	Etapa	Descripción	Cant.	Unid.	Entrada	Salida	
PROCESO BECOLSUB	Tornillo	Pulpa	2.18	kg	X		
		Mucilago	0.75	kg	X		
	Sin Fin	4 Mezcla pulpa más mucilago	2.93	kg		X	
	Fosa de pulpa		Mezcla pulpa más mucilago	2.93	kg	X	
			Transporte de fertilizante inorgánico	0;0068	tkm	X	

## Apéndice E. Inventario proceso secado de café

Tabla 5-1. Inventario silo.

Proceso	Etapas	Descripción	Cantidad	Unidad	Entrada	Salida
Proceso de secado del café	Silo para el secado del café	café seco de agua	1.6	kg	X	
		Energía moto rsilo	0;0206	kwh	X	
		Gas licuado de Petróleo masa <sup>13</sup>	0;0668	kg		
		Calor producido en 0;0668 kg de GLP	1.48	MJ		
		Transporte	0;0024*	tkm	X	
		café pergamino seco	1	kg		X

\*40 km de recorrido ida y vuelta

La tabla 5-2 muestra los factores de emisión de GLP al secar 1 kg de café pergamino seco en una base de volumen (lb/1000 gal), (lb/103 gal) reportadas en la United States Environmental Protection Agency (US EPA), tomando como base el GLP Colombiano (mezcla de 85% butano más 15% de propano), determinado la cantidad de GLP necesario para secar 1 kg de c.p.s, donde se determinan los posible kg de gas contaminante utilizado para secar 1 kg de c.p.s.

<sup>13</sup> - Según datos de entrevista, 1 cilindro de gas propano de 100 lbs (50 kg) (20 m<sup>3</sup> de glp) alcanza para secar 6 cargas de café (750 kg de cps). Para secar en el silo de café 1 kg de cps se utilizan 0.0267 m<sup>3</sup> de glp - 0.14 lb de glp - 0.0668 kg de glp (0;09 m<sup>3</sup> de glp).

Tabla 5-2. Factores de emisión para la combustión de GLP y emisiones por kg de c.ps.

Componente	a. Factor de emisión	a. Factor de emisión	d.lb/1000 gal GLP	e.Lb de contaminante/1000 gal GLP/1 kg cps	kg de contaminante/1 kg cps
	b.C4	c.C3			
PM total	0;8	0;7	0;785	19;890505	0;0090222
SO2	0;09	0;1	0;1915	4;8522696	0;002201
NO2	15	13	14;7	372;47187	0;1689503
N2O	0;9	0;9	0;9	22;8044	0;0103439
CO2	14;3	12;5	14;03	355;49526	0;1612498
CO	8;4	7;5	8;265	209;42041	0;0949914
VOC	1;1	1	1;085	27;491971	0;0124701
CH4	0;2	0;2	0;2	5;0676445	0;0022986

Notas:

a. Factor de emisión reportado en la United States Environmental Protection Agency (US EPA)

(base de volumen de lb/1000 gal) (1).

b. Butano

c. Propano

d. Se asume GLP Colombiano, pureza del 85% para el butano y 15% para el propano.

e. Para secar 1 kg de c.p.s, se utilizan 25,33 gal de GLP.

Tabla 5-3. Emisiones de Biogás después de la combustión (Meneses et al., 2016).

Contaminante	100% biogás (kg)
NO	0.000006166
CO	0.00001973
CO <sub>2</sub> , biogenico	0.03433
CH4	9.4559E-06

Contaminante	100% biogás (kg)
NMVO	8.222E-07
N <sub>2</sub> O	1.0278E-06
SO <sub>2</sub>	8.6353E-06

## 5 -2 MATRIZ DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA COLOMBIANA

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Pct.	Categoría	Comentario	
Electricidad Colombia (Insertar línea aquí)	1	MJ	Energy	100 %	Electricity co... Production		
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	in ground	0;00177	kg	Indefinido			5.2 % energía equivalente del mix
Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	in ground	0	kg	Indefinido			No se incluye autogeneración, porque está impedida de participar en el interconectado nacional
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	in ground	0;00910	kg	Indefinido			27.6 % energía equivalente del mix
Energy, from hydro power	in water	0;03	MJ	Indefinido			Pequeñas hidro a filo de montaña
Energy, from hydro power	in ground	0;64	MJ	Indefinido			Grandes represas
Energy, kinetic (in wind), converted	in ground	0;001	MJ	Indefinido			Jepirachi, Guajira
Occupation, water bodies, artificial	in ground	0;006272	m2a	Indefinido			Afectación Hydro
Transformation, from water bodies, artificial	in ground	0;000041	m2	Indefinido			Afectación Hydro
Transformation, to unknown	in ground	0;000041	m2	Indefinido			Afectación Hydro
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario	
Lubricating oil, at plant/RER S	0;000001255	kg	Indefinido				
Emisiones al aire							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
Sulfur oxides	low. pop.	0;000032	kg	Indefinido			Datos promedio considerando la redistribución el mix eléctrico según fuentes para el caso colombiano.
Nitrogen dioxide	low. pop.	0;000051	kg	Indefinido			IDEM
Carbon monoxide	low. pop.	0;000000674	kg	Indefinido			IDEM
Carbon dioxide	low. pop.	0;02219	kg	Indefinido			IDEM
Hydrocarbons, unspecified	low. pop.	0;000000712	kg	Indefinido			IDEM
Soot	low. pop.	0;000035	kg	Indefinido			IDEM
Particulates, SPM	low. pop.	0;00000156	kg	Indefinido			IDEM
Carbon dioxide, land transformation	high. pop.	0;018644	kg	Indefinido			Afectación Hydro
Methane, biogenic	high. pop.	0;000305	kg	Indefinido			Afectación Hydro
Dinitrogen monoxide	high. pop.	0;000000138	kg	Indefinido			Afectación Hydro
Heat, waste	indoor	0;000041	MJ	Indefinido			Afectación Hydro
Salidas conocidas a la tecnósfera. Residuos y emisiones para tratamiento							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario	
Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH S	0;000001255	kg	Indefinido				

Figura 5- 1. Declaración de la "Matriz de la Energía Eléctrica Colombiana " como proceso unitario en la interfase de ACV SimaPro.

**Apéndice F. Inventario proceso de tratamiento de aguas residuales.**Tabla 6-1. *Inventario tratamiento de aguas residuales.*

Proceso	Etapas	Descripción	Cantidad	Unidad	Entrada	Salida
Proceso Anaerobico	Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio	Agua Residual sin TTO	0;004	m3	X	
		DQO antes del tratamiento	57;2	gr	X	
		estiércol	0.00027	m3	X	
		Agua Residual con TTO (- lodos)	0;00422	m3		X
		Lodos	0;0000203	m3		X
		DQO después del tratamiento	14;15	gr		X
		DQO removida	43.0	gr		X
		Metano producido por la DQO removida, en masa	10.8	gr		X
		Metano producido por la DQO removida, en volumen	0.016	m3		X
		Biogás producido (85% metano, 15 % CO2)	0.018	m3		X
Necesidad de biogás para secar 1 g de cps	0.048	m3		X		

- Para las emisiones de CH<sub>4</sub>/kg de cps. el valor de la DQO removida, fue multiplicado por el factor de emisión del IPCC, para tratamiento anaerobio 0.25 kg deCH<sub>4</sub>/kg COD.

\_ Factor de corrección para el biogás producido considerando el 5% de perdidas por fugas.

## Apéndice G. Composición de la pulpa de café

Determinación	Pulpa de café sola			Pulpa de café mezclada con mucilago		
	Fresca	Dos meses	Lombricompuesto	Fresca	Dos meses	Lombricompuesto
Humedad (%)	74,83	79,60	78,05	87,90	83,33	79,48
pH	4,40	8,25	8,63	4,13	7,08	9,33
Cenizas (%)	6,66	14,68	44,06	7,30	10,17	50,21
Grasas (%)	1,60	1,49	0,16	2,00	1,82	0,20
Proteína (%)	11,00	19,91	23,25	12,11	18,14	25,89
Fibra (%)	11,43	29,47	12,55	17,16	25,04	16,84
CHO solubles (%)	69,31	34,47	20,00	61,44	44,83	6,86
MO (%)	93,34	85,33	55,94	92,70	89,83	49,79
C/N	30,72	15,55	8,73	27,95	18,60	6,98
N (%)	1,76	3,19	3,72	1,94	2,90	4,14
P (%)	0,13	0,23	0,44	0,13	0,18	0,31
K (%)	2,82	6,55	9,64	2,75	3,79	5,50
Ca (%)	0,32	0,75	1,15	0,37	0,75	1,30
Mg (%)	0,08	0,18	0,21	0,11	0,18	0,25
Fe (ppm)	158,75	1575	3062,50	700,00	1170,00	2201,67
Mn (ppm)	69,00	95,50	163,33	43,00	96,50	179,83
Zn (ppm)	8,25	76,00	149,17	45,75	83,50	118,67
Cu (ppm)	9,75	15,00	6,92	17,75	17,00	7,33
B (ppm)	21,75	45,00	73,67	18,75	38,00	67,08

Figura 7-1 . Resultados del análisis fisicoquímico de los sustratos de la pulpa de café sola y mezclada con mucílago en tres pasos del proceso de lombricompostaje.

Tabla 7-1. Pulpa de café reclamada.

Pulpa de café reclamada	Cantidad	Unidad
pulpa + mucilago	2.93	kg
pulpa de café mezclada con mucilago (2 meses de descomposición)	2.90	%
Contenido de N en la pulpa producida al procesar 1 kg de cps	0.08	kg
kg de urea remplazada (1000 gr de pulpa con 29 g de N)	0.062	kg

Pulpa de café reclamada	Cantidad	Unidad
Emisiones al aire N2O	0.0012	kg
Emisiones al aire CO2	0.12	kg
Transporte	0.0025	tkm

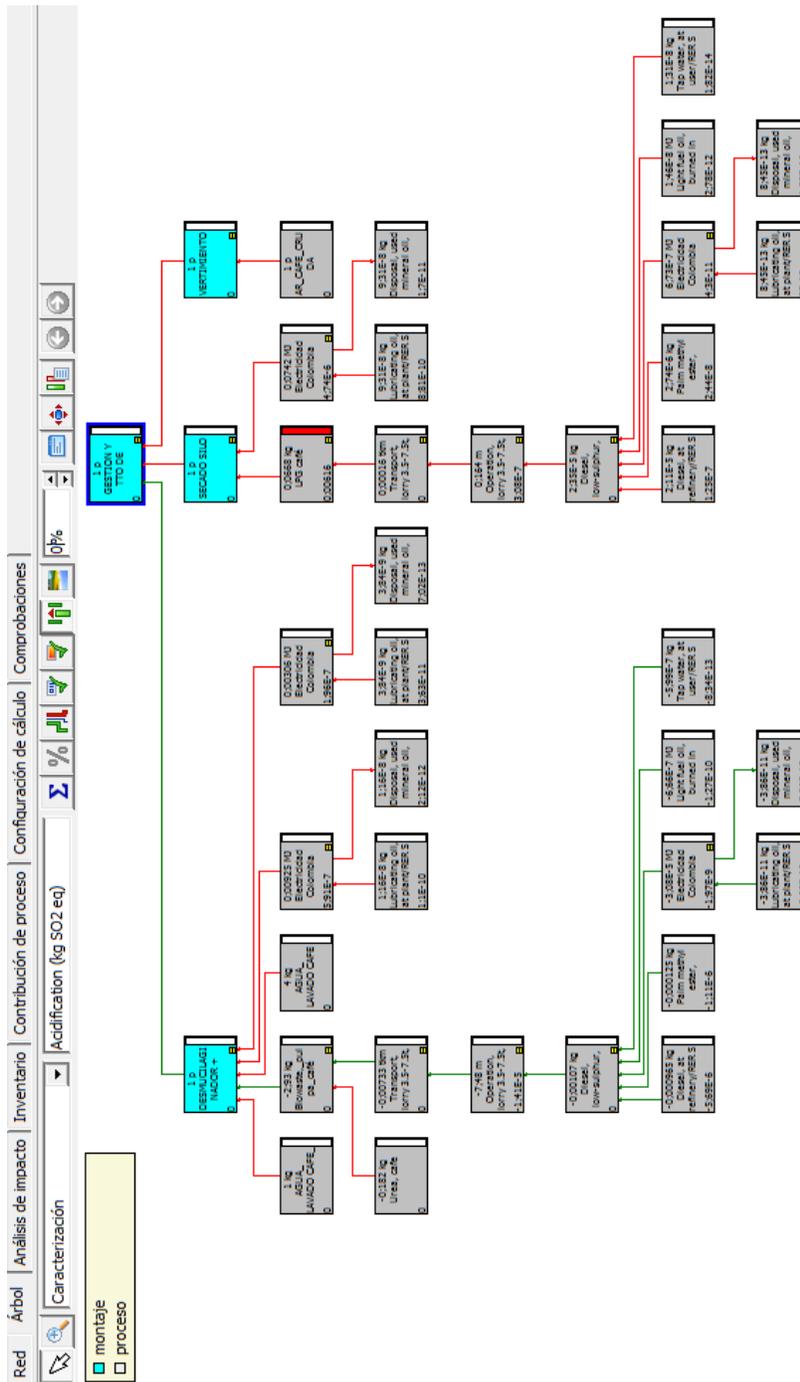
## 7.2 EMISIONES POR EL TRANORTE.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Pct.	Tipo de residuo	Categoría	Comentario
Biowaste_pulpa_café	1	kg	Mass	100 %	Compost	Agricultural/Others	SWITZERLAND
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario
Carbon dioxide, in air	in air	0,299	kg	Lognormal	1;29		(3,4,3,3,1,5); own calculation based on literature studies
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario	
Urea, cafe	0,062	kg	Indefinido			kg de urea remplazada (1000 gr de pulpa con 29 g de N)	
Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO3/RER U cafe	0,0025	tkm	Indefinido				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Salidas							
Emisiones al aire							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario
Dinitrogen monoxide	low. pop.	0,0012	kg	Indefinido			Emisiones pulpa
Carbon dioxide	low. pop.	0,12	kg	Indefinido			Emisiones pulpa

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Pct.	Categoría	Comentario	
Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO3/RER U cafe	1	tkm	Transport	100 %	Road	Europe	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMín.	Máx.	Comentario	
Operation, lorry 3.5-7.5t, EURO3/RER U cafe	1,0206	km	Lognormal	2;0131		(3,1,1,1,1,na); own calculations	
Lorry 16t/RER/I U	0	p	Lognormal	3;0125		(3,1,1,2,1,na); own calculations	
Maintenance, lorry 16t/CH/I U	0	p	Lognormal	3;0125		(3,1,1,2,1,na); own calculations	
Road/CH/I U	0	my	Lognormal	3;0124		(3,1,1,1,1,na); own calculations	
Operation, maintenance, road/CH/I U	0	my	Lognormal	3;0124		(3,1,1,1,1,na); own calculations	
(Insertar línea aquí)							

Figura 7-2. Emisiones transporte

Apéndice H. Árbol de ciclo de vida del escenario línea base. Acidification (kg SO2 eq.)  
 método CML.







Apéndice I. Sustancias por categoría de impacto.

9-1. CATEGORIA POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN.

No	Sustancia	Compartime /	Unidad	GESTION Y TTO DE EFLUENTE	GESTION Y TTO DE EFLUENTE2	GESTION Y TTO DE EFLUENTE3
	Total of all compartments		kg SO2 eq	0,00615	0,00615	0,00387
1	Ammonia	Aire	kg SO2 eq	-4,71E-7	-4,71E-7	-4,68E-7
2	Nitrogen dioxide	Aire	kg SO2 eq	0,000346	0,000347	0,000219
3	Nitrogen oxides	Aire	kg SO2 eq	0,00563	0,00563	0,00354
4	Sulfur dioxide	Aire	kg SO2 eq	0,000171	0,000171	0,000106
5	Sulfur oxides	Aire	kg SO2 eq	3,32E-6	3,84E-6	3,83E-6

Comparando 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE), 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE2) y 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE3); Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / World, 1990 / Caracterización

Figura 9-1. Sustancias categoría de Impacto Potencial de Acidificación.

9-2. CATEGORIA POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN.

No	Sustancia	Compartime /	Unidad	GESTION Y TTO DE EFLUENTE	GESTION Y TTO DE EFLUENTE2	GESTION Y TTO DE EFLUENTE3
	Total of all compartments		kg PO4--- eq	0,00348	0,00256	0,00199
1	Ammonia	Aire	kg PO4--- eq	-1,03E-7	-1,03E-7	-1,02E-7
2	Ammonium carbonate	Aire	kg PO4--- eq	-1,64E-13	-1,64E-13	-1,63E-13
3	Nitrate	Aire	kg PO4--- eq	-2,16E-14	-2,16E-14	-2,15E-14
4	Nitrogen dioxide	Aire	kg PO4--- eq	9E-5	9,01E-5	5,7E-5
5	Nitrogen oxides	Aire	kg PO4--- eq	0,00146	0,00146	0,00092
6	Phosphorus	Aire	kg PO4--- eq	-1,33E-9	-1,33E-9	-1,32E-9
7	Ammonium, ion	Agua	kg PO4--- eq	-2,91E-9	-2,91E-9	-2,89E-9
8	COD, Chemical Oxygen Demand	Agua	kg PO4--- eq	0,00126	0,000311	0,000311
9	Nitrate	Agua	kg PO4--- eq	-2,23E-7	-2,23E-7	-2,22E-7
10	Nitrite	Agua	kg PO4--- eq	-2,32E-11	-2,32E-11	-2,31E-11
11	Nitrogen	Agua	kg PO4--- eq	-1,57E-9	-1,57E-9	-1,57E-9
12	Nitrogen, total	Agua	kg PO4--- eq	0,000588	0,00063	0,00063
13	Phosphate	Agua	kg PO4--- eq	8E-5	7E-5	7E-5
14	Phosphorus	Agua	kg PO4--- eq	-1,43E-8	-1,43E-8	-1,42E-8
15	Phosphorus	Suelo	kg PO4--- eq	-1,03E-8	-1,03E-8	-1,02E-8

Comparando 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE), 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE2) y 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE3); Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / World, 1990 / Caracterización

Figura 9-2. Sustancias categoría de Impacto Potencia de Eutrofización.

9-3. CATEGORIA PODER DE CALENTAMIENTO GLOBAL.

No	Sustancia	Compartime /	Unidad	GESTION Y TTO DE EFLUENTE	GESTION Y TTO DE EFLUENTE2	GESTION Y TTO DE EFLUENTE3
	Total of all compartments		kg CO2 eq	0,0571	0,286	0,0549
1	Carbon dioxide, in air	Crudo	kg CO2 eq	0,000483	0,000483	0,00048
2	Carbon dioxide	Aire	kg CO2 eq	0,0127	0,013	0,00899
3	Carbon dioxide, biogenic	Aire	kg CO2 eq	-0,000176	-0,000176	0,000685
4	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg CO2 eq	-0,00363	-0,00363	-0,00361
5	Carbon dioxide, land transformation	Aire	kg CO2 eq	0,00151	0,00177	0,00176
6	Carbon monoxide	Aire	kg CO2 eq	0,0097	0,0097	0,00611
7	Carbon monoxide, biogenic	Aire	kg CO2 eq	-2,22E-8	-2,22E-8	-2,21E-8
8	Carbon monoxide, fossil	Aire	kg CO2 eq	-1,71E-5	-1,71E-5	-1,7E-5
9	Chloroform	Aire	kg CO2 eq	-2,23E-12	-2,23E-12	-2,22E-12
10	Dinitrogen monoxide	Aire	kg CO2 eq	-0,000259	0,00779	0,0078
11	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	Aire	kg CO2 eq	-8,2E-12	-8,2E-12	-8,15E-12
12	Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	Aire	kg CO2 eq	-3,68E-14	-3,68E-14	-3,66E-14
13	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Aire	kg CO2 eq	-8,53E-11	-8,53E-11	-8,47E-11
14	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Aire	kg CO2 eq	-6,06E-12	-6,06E-12	-6,02E-12
15	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Aire	kg CO2 eq	-1,11E-8	-1,11E-8	-1,1E-8
16	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Aire	kg CO2 eq	-1,55E-8	-1,55E-8	-1,54E-8
17	Methane	Aire	kg CO2 eq	0,0363	0,256	0,032
18	Methane, biogenic	Aire	kg CO2 eq	0,000606	0,000701	0,000704
19	Methane, bromo-, Halon 1001	Aire	kg CO2 eq	-5,09E-21	-5,09E-21	-5,06E-21
20	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	Aire	kg CO2 eq	-1,57E-9	-1,57E-9	-1,56E-9
21	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	Aire	kg CO2 eq	-2,39E-7	-2,39E-7	-2,38E-7
22	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	Aire	kg CO2 eq	-7,73E-9	-7,73E-9	-7,69E-9
23	Methane, dichloro-, HCC-30	Aire	kg CO2 eq	-7,91E-14	-7,91E-14	-7,86E-14
24	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	Aire	kg CO2 eq	-1,13E-10	-1,13E-10	-1,12E-10
25	Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	Aire	kg CO2 eq	-1,6E-15	-1,6E-15	-1,59E-15
26	Methane, fossil	Aire	kg CO2 eq	-5,19E-5	-5,19E-5	-5,16E-5
27	Methane, monochloro-, R-40	Aire	kg CO2 eq	-1,12E-13	-1,12E-13	-1,12E-13
28	Methane, tetrachloro-, CFC-10	Aire	kg CO2 eq	-9,65E-10	-9,65E-10	-9,59E-10
29	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	Aire	kg CO2 eq	-6,33E-8	-6,33E-8	-6,29E-8

Comparando 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE), 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE2) y 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE3); Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / the Netherlands, 1997 / Caracterización

Figura 9-3. Sustancias categoría de Impacto Potencia de Calentamiento Global.

9-4. CATEGORIA RESPIRATORIOS INORGÁNICOS.

No	Sustancia	Compartime /	Unidad	GESTION Y TTO DE EFLUENTE	GESTION Y TTO DE EFLUENTE2	GESTION Y TTO DE EFLUENTE3
	Total of all compartments		kg PM2.5 eq	0,00154	0,00154	0,000967
1	Ammonia	Aire	kg PM2.5 eq	-3,58E-8	-3,58E-8	-3,55E-8
2	Carbon monoxide	Aire	kg PM2.5 eq	6,62E-6	6,62E-6	4,17E-6
3	Nitrogen dioxide	Aire	kg PM2.5 eq	8,81E-5	8,82E-5	5,58E-5
4	Nitrogen oxides	Aire	kg PM2.5 eq	0,00143	0,00143	0,000901
5	Particulates, < 2.5 um	Aire	kg PM2.5 eq	-1,42E-6	-1,42E-6	-1,41E-6
6	Sulfur dioxide	Aire	kg PM2.5 eq	1,11E-5	1,11E-5	6,91E-6
7	Sulfur oxides	Aire	kg PM2.5 eq	2,16E-7	2,5E-7	2,49E-7

Comparando 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE), 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE2) y 1p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE3); Método: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

Figura 9-4. Sustancias categoría de Impacto Respiratorios Inorgánicos.

## 9-5. CATEGORIA USO DE ENERGÍA NO RENOVABLE.

The screenshot shows the software interface with the following settings:

- Compartimento: Todos los compartimentos
- Indicador: Caracterización
- Valor de Corte: 0%
- Categoría: Non-renewable energy
- Por sub-compartimento:
- Qmitir no usado:  Unidades grede:
- Por categoría de impacto:

No	Sustancia	Compartime /	Unidad	GESTION Y TTO DE EFLUENTE	GESTION Y TTO DE EFLUENTE2	GESTION Y TTO DE EFLUENTE3
	Total of all compartments		MJ primary	-0;0246	-0;0246	-0;0252
1	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	MJ primary	0;00448	0;00448	0;00446
2	Coal, brown, in ground	Crudo	MJ primary	-0;000297	-0;000297	-0;0003
3	Coal, hard, unspecified, in ground	Crudo	MJ primary	-0;000496	-0;000496	-0;0005
4	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	MJ primary	0;0238	0;0238	0;0237
5	Gas, natural, in ground	Crudo	MJ primary	-0;00296	-0;00296	-0;00298
6	Oil, crude, in ground	Crudo	MJ primary	-0;0483	-0;0483	-0;0487
7	Peat, in ground	Crudo	MJ primary	-1;85E-8	-1;85E-8	-1;87E-8
8	Uranium, in ground	Crudo	MJ primary	-0;000879	-0;000879	-0;000886
9	Wood, hard, standing	Crudo	MJ primary	0	0	0
10	Wood, soft, standing	Crudo	MJ primary	0	0	0
11	Wood, unspecified, standing/m3	Crudo	MJ primary	0	0	0

Comparando 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE), 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE2) y 1 p (GESTION Y TTO DE EFLUENTE3); Método: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

Figura 9-5. Sustancias categoría de Impacto Energía No renovable.