



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia a partir del Análisis de Ciclo Vida

Ana Paola Becerra Quiroz

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental  
Bogotá, Colombia

2016



# **Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia a partir del Análisis de Ciclo Vida**

**Ana Paola Becerra Quiroz**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:  
**Magister en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental**

Directora:

Ph.D (C) Luisa Fernanda González Ramírez

Codirectora:

Ph.D. Paola Andrea Acevedo Pabón

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental Productiva

Grupo de Investigación:

GEAUD

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental  
Bogotá, Colombia

2016



*A Jacobo  
y a la memoria de mi querida tía Zena*



## **Agradecimientos**

A la Msc. Luisa Fernanda González Ramírez y a la Ph.D Paola Andrea Acevedo Pabón, directora y codirectora del proyecto, por su orientación y apoyo. Al ingeniero David Palacios de Cenicaña por la gestión de información de los ingenios azucareros del Valle. Al Ingeniero Hernán Vidal Castillo especialista de Gestión de Ambiental Carvajal Pulpa y Papel (Carvajal Pulpa y Papel) por su aporte en lo relacionado con el proceso de producción de papel y sus impactos ambientales, a la Ingeniera Nidia Ortiz, por su apoyo en el área de termodinámica y por su acompañamiento incondicional. A todos mis compañeros de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, por su colaboración desinteresada durante el desarrollo de este proyecto. A Leo, mi hermanita, mi cuñada, mis papitos por sus incansables jornadas con Jacobo, a mi familia por su paciencia y a Andrés por su acompañamiento y amor.



## Resumen

En la presente tesis se evaluó la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca Colombia. Para tal fin se realizó un diagnóstico de la situación actual, en donde se recopiló la información relevante de las variables ambientales, económicas y sociales. Seguidamente se aplicó la metodología de Análisis del Ciclo de Vida ACV, a los dos procesos actuales de aprovechamiento que son la cogeneración de energía y la producción de papel, como instrumento para la evaluación ambiental. Para tal fin se elaboraron los respectivos balances másicos y energéticos por procesos unitarios del sistema, seguidamente se realizó la evaluación ambiental con el software especializado SIMAPRO, en donde se analizaron seis categorías de impacto. Se encontró que los procesos unitarios de que generan mayores impactos ambientales son la caldera para el caso de la cogeneración de energía y el blanqueo de la pulpa para el caso de la producción de papel. Para dar alcance a la evaluación de la sustentabilidad, se aplicaron las metodologías de Análisis de Costos de Ciclo de Vida LCC y Análisis de los stakeholders, que evaluaron las dimensiones económica y social respectivamente. Finalmente se integraron los resultados de las tres dimensiones: Ambiental con ACV, Económica con LCC y social con el Análisis de stakeholders mediante la metodología Proceso Analítico Jerárquico AHP que concluyó que es más sustentable el aprovechamiento del bagazo para la producción de papel que para la producción de vapor, y se dieron recomendaciones de sustentabilidad.

**Palabras clave:** Análisis de Ciclo de Vida, Análisis de Costos de Ciclo de Vida, Análisis de Stakeholders, Evaluación de la Sustentabilidad, bagazo de caña de azúcar

## **Abstract**

The sustainability of the use of sugar cane bagasse in the Valle del Cauca Colombia was evaluated. For this purpose a diagnosis of the current situation, where relevant information on environmental, economic and social variables were collected was performed. Then the methodology of Life Cycle Analysis LCA to use two current processes that are energy cogeneration and paper production, as a tool for environmental evaluation was applied. For this purpose the respective mass and energy balances were developed by unitary system processes, then the environmental assessment was performed with specialized software SIMAPRO, where six categories of impact were analyzed. It was found that the unit processes that generate greater environmental impacts are the boiler in the case of cogeneration energy and pulp bleaching in the case of paper production. To reach the assessment of sustainability, methodologies Cost Analysis Life Cycle LCC and stakeholders Analysis, assessing the economic and social dimensions were applied respectively. Finally the results of the three dimensions were integrated: Environmental with ACV, Economic with LCC and social with stakeholder analysis using the methodology Analytic Hierarchy Process AHP which concluded that is more sustainable utilization of bagasse for the production of paper for the production steam and sustainability recommendations were given.

**Keywords: Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost, Stakeholders Assesment, sustainability assessment**

# Contenido

|   | Pág.      |
|---|-----------|
| <b>1. MARCO REFERENCIAL .....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1 Marco Teórico .....   | 5         |
| 1.1.1 Análisis de Ciclo de Vida ACV .....   | 5         |
| 1.1.2 Análisis del Costo del ciclo de vida LCC .....  | 9         |
| 1.1.3 Teoría de los Stakeholders .....  | 10        |
| 1.1.4 Proceso Analítico Jerárquico AHP .....  | 11        |
| 1.2 Marco Conceptual .....  | 12        |
| 1.2.1 Desarrollo histórico del concepto de sustentabilidad y visión latinoamericana   | 12        |
| 1.2.2 El Bagazo de caña de azúcar en Colombia .....   | 17        |
| 1.3 Marco Contextual .....  | 21        |
| 1.3.1 Marco Geográfico y Sectorial .....  | 21        |
| 1.3.2 'Marco Institucional' .....   | 23        |
| 1.4 Marco Legal .....   | 25        |
| <b>2. MARCO METODOLÓGICO .....</b>  | <b>29</b> |
| 2.1 Fase 1: Diagnóstico de la situación actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar .....   | 31        |
| 2.2 Fase 2: Análisis del Ciclo de Vida del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia .....   | 32        |
| 2.2.1 Objetivo y alcance del ACV .....  | 32        |
| 2.2.2 Análisis de Inventario .....  | 33        |
| 2.2.3 Selección de categorías de impacto .....  | 36        |
| 2.2.4 Evaluación Ambiental con el software SIMAPRO .....  | 37        |
| 2.3 Fase 3. Inclusión de las dimensiones económica y social al Análisis del Ciclo de Vida .....   | 38        |
| 2.3.1 Metodología Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC .....  | 38        |
| 2.3.2 Metodología para el análisis de los stakeholders .....  | 40        |
| 2.3.3 Desarrollo del Indicador de Sustentabilidad .....   | 41        |
| Por medio de la metodología Proceso Analítico Jerárquico AHP se integraron los resultados del ACV para la dimensión ambiental, del LCC para la dimensión económica y el Análisis de Stakeholders para la dimensión social, con el fin de evaluar la sustentabilidad. .... | 41        |
| 2.3.4 Recomendaciones de sustentabilidad .....  | 42        |
| <b>3. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA .....</b>  | <b>43</b> |
| 3.1 Descripción de los Procesos del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar .....  | 45        |
| 3.2 Análisis de la Dimensión Ambiental de la Sustentabilidad .....  | 47        |
| 3.2.1 Vertimientos .....  | 53        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 3.2.2     | Consumo de agua .....  | 55         |
| 3.2.3     | Consumo de energía .....   | 57         |
| 3.2.4     | Emisiones Atmosféricas .....   | 58         |
| 3.2.5     | Generación de Residuos .....   | 60         |
| 3.3       | Análisis de la Dimensión Económica de la Sustentabilidad .....   | 62         |
| 3.4       | Análisis de la Dimensión Social de la Sustentabilidad .....  | 64         |
| <b>4.</b> | <b>ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA.....</b> | <b>69</b>  |
| 4.1       | Análisis del inventario del Ciclo de Vida .....  | 69         |
| 4.1.1     | Cogeneración de energía .....  | 77         |
| 4.1.2     | Elaboración de Papel .....   | 83         |
| 4.2       | Evaluación de Impacto .....  | 106        |
| 4.2.1     | Impactos Ambientales generados en la producción de vapor .....   | 106        |
| 4.2.2     | Impactos Ambientales generados en la producción de Papel .....   | 113        |
| 4.3       | Análisis de Resultados del ACV .....   | 120        |
| 4.3.1     | Análisis de Resultados para el aprovechamiento del bagazo para la producción de vapor .....                              | 121        |
| 4.3.2     | Análisis de Resultados para el aprovechamiento del bagazo para la producción de papel .....                              | 123        |
| <b>5.</b> | <b>INCLUSIÓN DE LAS DIMENSIONES ECONÓMICA Y SOCIAL AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....</b>                               | <b>125</b> |
| 5.1       | Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC .....   | 125        |
| 5.1.1     | Perfil Operativo y Factor de Utilización .....   | 125        |
| 5.1.2     | Descripción de los elementos de costo .....  | 126        |
| 5.1.3     | Cálculo del Valor Presente Neto VPN y la Tasa Interna de Retorno TIR .....   | 128        |
| 5.2       | Análisis de los Stakeholders .....   | 134        |
| 5.2.1     | Intereses de los stakeholders .....  | 134        |
| 5.2.2     | Matriz Poder / Interés .....   | 137        |
| 5.3       | Proceso Analítico Jerárquico: Indicador de Sustentabilidad .....   | 143        |
| <b>6.</b> | <b>RECOMENDACIONES DE SUSTENTABILIDAD.....</b>   | <b>149</b> |
| 6.1       | Recomendaciones a la Dimensión Ambiental .....   | 150        |
| 6.1.1     | Uso eficiente del agua .....   | 151        |
| 6.1.2     | Manejo de los vertimientos .....   | 152        |
| 6.1.3     | Consumo de energía .....   | 152        |
| 6.1.4     | Control de las emisiones atmosféricas .....  | 153        |
| 6.1.5     | Manejo de los residuos sólidos .....   | 154        |
| 6.2       | Recomendaciones a las Dimensiones Económica y Social .....   | 155        |
| <b>7.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>161</b> |
| 7.1       | Conclusiones .....   | 161        |
| 7.2       | Recomendaciones .....  | 162        |

# Lista de figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Marco del análisis de ciclo de vida Norma ISO 14040 .....  | 6           |
| Figura 2. Ubicación espacial de los ingenios azucareros en el Valle del Cauca .....  | 22          |
| Figura 3. Entidades relacionadas con el sector azucarero colombiano .....  | 24          |
| Figura 4. Estructura jerárquica para la toma de decisiones.....  | 42          |
| Figura 5. Diagrama esquemático del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca .....                | 44          |
| Figura 6. Identificación de Aspectos ambientales en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar .....     | 52          |
| Figura 7. Concentración de PM 10 en el Valle del Cauca 2011.....   | 59          |
| Figura 8. Diagrama de Procesos de Preparación y lavado de la caña, y molienda .....  | 71          |
| Figura 9. Proceso de Cogeneración usual de los ingenios del Valle del Cauca .....  | 77          |
| Figura 10. Diagrama de procesos de cogeneración con bagazo .....   | 79          |
| Figura 11. Proceso de elaboración de papel.....  | 84          |
| Figura 12. Diagrama de procesos producción de papel.....   | 85          |
| Figura 13. Diagrama de procesos de cogeneración con médula .....   | 95          |
| Figura 14. Diagrama de procesos de recuperación de químicos .....  | 101         |
| Figura 15. Árbol de contribución de impactos de la categoría Acidificación en la producción de Vapor .....                 | 107         |
| Figura 16. Árbol de contribución de impactos de la categoría Eutrofización en la producción de Vapor .....                 | 108         |
| Figura 17. Árbol de contribución de impactos de la categoría Calentamiento Global en la producción de Vapor.....           | 109         |
| Figura 18. Árbol de contribución de impactos de la categoría Oxidación Fotoquímica en la producción de Vapor.....          | 110         |
| Figura 19. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro de la capa de Ozono en la producción de Vapor.....  | 111         |
| Figura 20. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro Abiótico en la producción de Vapor .....            | 112         |
| Figura 21. Perfil medio ambiental proceso de generación de Vapor .....   | 113         |
| Figura 22. Árbol de contribución de impactos de la categoría Acidificación en la producción de Papel .....                 | 114         |
| Figura 23. Árbol de contribución de impactos de la categoría Eutrofización en la producción de Papel .....                 | 115         |
| Figura 24. Árbol de contribución de impactos de la categoría Calentamiento Global en la producción de Papel .....          | 116         |
| Figura 25. Árbol de contribución de impactos de la categoría Oxidación Fotoquímica en la producción de Papel .....         | 117         |
| Figura 26. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro de la capa de Ozono en la producción de Papel ..... | 118         |
| Figura 27. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro Abiótico en la producción de Papel .....            | 119         |
| Figura 28. Perfil medio ambiental proceso de producción de vapor.....  | 120         |
| Figura 29. Grupos de Stakeholders asociados al proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar .....               | 134         |
| Figura 30. Mapeo de Stakeholders proceso de Producción de Vapor .....  | 139         |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 31. Mapeo de Stakeholders proceso de Producción de Papel .....              | 140 |
| Figura 32. Proceso Analítico Jerárquico: Indicador de Sustentabilidad.....         | 144 |
| Figura 33. Expresión gráfica del indicador de sustentabilidad .....                | 149 |
| Figura 34. Expresión gráfica de la dimensión ambiental de la sustentabilidad ..... | 150 |
| Figura 35. Comparación de las tres dimensiones de la sustentabilidad .....         | 155 |
| Figura 36. Dimensión social de la sustentabilidad .....                            | 156 |

## Lista de tablas

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1: Marco legal del proyecto .....  | 25          |
| Tabla 2: Marco metodológico .....  | 30          |
| Tabla 3: Entidades visitadas.....  | 31          |
| Tabla 20: Cifras anuales asociadas al sistema en KToneladas .....                            | 32          |
| Tabla 4: Características más importantes de los insumos utilizados en el software .....      | 34          |
| Tabla 5: Categorías de Impacto de la Metodología EPD (2013) .....                            | 37          |
| Tabla 6: Clasificación Poder/Interés .....   | 40          |
| Tabla 7: Criterios de análisis de los grupos de interés.....                                 | 41          |
| Tabla 8: Descripción de los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.....    | 46          |
| Tabla 9: Datos de DBO <sub>5</sub> , DQO y SST en el efluente de los ingenios .....          | 53          |
| Tabla 10: Caracterización del afluente y efluentes de la PTAR de Carvajal Pulpa y Papel..... | 55          |
| Tabla 11: Uso del agua en el proceso de cogeneración en los ingenios azucareros .....        | 56          |
| Tabla 12: onitoreo de emisiones en la planta de Carvajal Pulpa y Papel .....                 | 60          |
| Tabla 13: Variables involucradas en la dimensión ambiental de la sustentabilidad .....       | 61          |
| Tabla 14: Variables involucradas en la dimensión económica de la sustentabilidad .....       | 63          |
| Tabla 15: Datos dimensión económica para Ingenios .....                                      | 63          |
| Tabla 16: Datos dimensión económica para Carvajal Pulpa y Papel.....                         | 64          |
| Tabla 17: Variables involucradas en la dimensión social de la sustentabilidad.....           | 65          |
| Tabla 18: Datos dimensión social para Asocaña.....   | 66          |
| Tabla 19: Datos dimensión social para Carvajal Pulpa y Papel .....                           | 67          |
| Tabla 21: Proceso unitario preparación y lavado de la caña .....                             | 73          |
| Tabla 22: Proceso unitario molienda .....  | 74          |
| Tabla 23: Proceso unitario calentamiento del agua de imbibición.....                         | 76          |
| Tabla 24: Proceso unitario alimentación de agua a la caldera de Bagazo .....                 | 81          |
| Tabla 25: Proceso unitario producción de vapor en la caldera de bagazo .....                 | 81          |
| Tabla 26: Proceso unitario producción de energía en la turbina en proceso de bagazo.....     | 82          |
| Tabla 27: Proceso unitario desaireación en proceso de Bagazo.....                            | 82          |
| Tabla 28. Proceso unitario reposición de agua en proceso de Bagazo.....                      | 83          |
| Tabla 29: Distancias de los ingenios a la planta de Carvajal Pulpa y Papel.....              | 84          |
| Tabla 30: Proceso unitario desmedulado .....   | 87          |
| Tabla 31: Proceso unitario preparación de la solución de soda .....                          | 88          |
| Tabla 32: Proceso unitario digestión con soda cáustica .....                                 | 88          |
| Tabla 33: Proceso unitario lavado de la pulpa.....   | 90          |
| Tabla 34: Proceso unitario blanqueo de la Pulpa .....  | 91          |
| Tabla 35: Proceso unitario máquina para hacer papel .....                                    | 92          |
| Tabla 36: Proceso unitario alimentación de agua a la caldera de la médula.....               | 97          |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 37: Proceso unitario producción de vapor en la caldera de médula .....                                | 97  |
| Tabla 38: Proceso unitario Producción de energía de la médula .....   | 98  |
| Tabla 39: Desaireación en el ciclo de la médula .....   | 98  |
| Tabla 40: Reposición de agua en el ciclo de la médula.....  | 99  |
| Tabla 41: Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Evaporadores .....                     | 103 |
| Tabla 42: Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Caldera de recuperación .....          | 104 |
| Tabla 43: Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Reactor (Tanque de dilución) .....     | 104 |
| Tabla 44: Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Clarificador .....                     | 104 |
| Tabla 45: Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Horno .....                            | 105 |
| Tabla 46: Comparación de los impactos generados con bagazo carbón para la generación de 1 Kg de Vapor ..... | 122 |
| Tabla 47: Comparación de los impactos generados con bagazo carbón para la generación de 1 Kg de Papel ..... | 123 |
| Tabla 48: Costos de adquisición .....   | 126 |
| Tabla 49: Descripción de las materias primas .....  | 126 |
| Tabla 50: Descripción de los servicios industriales .....   | 127 |
| Tabla 51: Cálculo de los ingresos para la cogeneración de energía .....                                     | 129 |
| Tabla 52: Cálculo de los ingresos para la producción de papel .....   | 129 |
| Tabla 53: Cálculo de los costos para la producción de papel (a) .....                                       | 130 |
| Tabla 54: Cálculo de los costos para la producción de papel (b) .....                                       | 131 |
| Tabla 55: Cálculo de los costos para la cogeneración de energía.....  | 131 |
| Tabla 56: Stakeholders del Proceso de Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar .....                    | 135 |
| Tabla 57: Intereses de las Stakeholders.....  | 136 |
| Tabla 58: Valoración de los grupos de interés.....  | 137 |
| Tabla 59: Ubicación de los stakeholders en los respectivos cuadrantes .....                                 | 137 |
| Tabla 60: Análisis de la Sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar por AHP .....     | 145 |
| Tabla 61: Recomendaciones a las estrategias desarrolladas por el sector.....                                | 157 |

# Introducción

El bagazo de la caña de azúcar brinda potencialidades a la industria de la caña de azúcar ya que se ha utilizado en procesos de cogeneración energética, en la producción de papel, en la producción de bioetanol y otros, con buenos resultados económicos. Colombia hasta hace pocos años inició la producción de electricidad por procesos de coogeneración de energía a partir del bagazo de caña; Sus avances en materia del mejoramiento de la eficiencia energética han contribuido hasta el punto que la combustión eficiente de éste ha permitido la generación de energía para el interior de los ingenios e incluso para comercializar en la red interconectada nacional. En la actualidad, de las seis millones de toneladas de bagazo producidas al año por los ingenios, un 85% es utilizado como combustible en procesos de cogeneración de energía y el restante 15% es materia prima de una industria productora de papeles local (Asocaña, 2013).

La cogeneración energética con el bagazo de caña de azúcar comenzó su expansión en los años 90 en Colombia y es considerada por sus generadores como la mejor forma de aprovechamiento de dicho residuo. Se proyecta que para el 2017 la capacidad de cogeneración será de 360 MW de los cuales se podrá vender a la red aproximadamente unos 166 MW (Asocaña, 2015).

Sin embargo, a pesar de ser la cogeneración de energía el proceso de aprovechamiento del bagazo que representa mayores beneficios económicos para los ingenios, sobre todo al compararlo con la producción de bioetanol a partir de este residuo, no se han evidenciado comparaciones en donde se tengan en cuenta los aspectos ambientales y sociales que intervienen en cada uno de los procesos. Por lo tanto, se desconoce si es más sustentable la cogeneración que los otros tipos de aprovechamiento.

Por otro lado, si se tiene en cuenta que la tendencia de desarrollo de los ingenios azucareros se inclina hacia el modelo de biorefinerías, se hace necesario analizar las

diversas formas de aprovechamiento que puedan traer nuevos y mejores beneficios en el marco de la competitividad y la sustentabilidad; o las mejoras en los procesos con este mismo fin.

Una de las herramientas más completas y precisas para evaluar los impactos ambientales en los procesos productivos es el Análisis de Ciclo de Vida, en donde se puede evidenciar claramente los impactos de cada uno de los procesos unitarios del producto en análisis. Sin embargo, para evaluar la sustentabilidad de los procesos, esta herramienta resulta insuficiente por no incluir las dimensiones económicas y sociales. Es por esto, que el presente trabajo pretende incluir estas dimensiones al Análisis de Ciclo de Vida, como estrategia para evaluación de sustentabilidad.

De acuerdo al anterior planteamiento, surgen dos preguntas de investigación:

- ¿Es posible evaluar la sustentabilidad del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar producido en el Valle del Cauca – Colombia a partir de un ACV?
- ¿Cuál de las dos formas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar producido en el Valle del Cauca es más sustentable: Cogeneración de energía o Producción de papel?

El presente trabajo se justifica por las razones que se describen a continuación.

La crisis ambiental generada por los actuales patrones de consumo, ha hecho que los diferentes sectores del desarrollo busquen soluciones a las problemáticas de consumo de recursos naturales, emisiones, vertimientos y recursos, ya sea como requisito normativo o como estrategia de gestión ambiental. Dichas soluciones se han dado históricamente de manera diferente: Inicialmente usando tuberías y chimeneas, luego por soluciones a final de tubo, luego actuando directamente sobre los procesos y en la actualidad haciendo seguimiento al ciclo de vida de los productos (Instituto Superior del Medio Ambiente, 2011). Por lo anterior, el Análisis del Ciclo de vida se convierte en la estrategia de gestión más completa para identificar y evaluar los impactos ambientales. El análisis del Ciclo de vida es una herramienta fundamental para determinar los

impactos ambientales que se generan en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

En la actualidad el bagazo de caña de azúcar es usado en el Valle del Cauca para procesos de cogeneración energética y para la producción de papel, lo que desde el punto de vista económico es adecuado para el sector. Sin embargo, el desempeño de cualquier sector del desarrollo debe evaluarse en función del concepto de la sustentabilidad. En el caso del sector azucarero, las cifras económicas que ofrece la bibliografía sobre el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, apuntan a que su uso en temas de cogeneración de energía ofrecen los mejores rendimientos económicos. Sin embargo hay vacíos de información en los temas sociales y ambientales que permitan acercarse a evaluar la sustentabilidad del aprovechamiento de este residuo.

Resulta oportuno teniendo en cuenta el estado del arte del aprovechamiento actual del bagazo de caña de azúcar en el Valle de Cauca - Colombia, realizar una evaluación de la sustentabilidad, en donde se adicionen al Análisis del Ciclo de Vida ACV que evalúa los impactos ambientales, un Análisis de Costos del ciclo de vida LCC para la dimensión económica y un Análisis de Stakeholders para la dimensión social, para finalmente integrar las tres dimensiones de la sustentabilidad en un Proceso Analítico Jerárquico.

Esta metodología podrá hacerse extensiva al análisis de nuevas formas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, de tal manera que logre evaluar desde la sustentabilidad y con una de las metodologías para evaluación de impactos más desarrolladas en la actualidad como lo es el ACV, nuevos proyectos de inversión que se quieran incluir para diversificar el aprovechamiento de este residuo.

De la misma manera, se puede sugerir esta metodología para dar viabilidad a otros proyectos de inversión de cualquier tipo de producto.

A partir de este trabajo se generarán dos artículos para la comunidad académica, que aportarán conocimiento e información en las temáticas relacionadas el Análisis de Ciclo de Vida, con el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar y con avances en la evaluación de la sustentabilidad de procesos industriales.

Este trabajo está limitado a la evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca Colombia a partir de un Análisis de Ciclo de Vida ACV, un Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC, un Análisis de stakeholders y un Proceso Analítico Jerárquico AHP. Los dos procesos de aprovechamiento del bagazo que se tienen en cuenta para este análisis, son el de la cogeneración de energía y la producción de papel, que en la actualidad constituyen más del 95% del aprovechamiento total de dicho subproducto en el Valle del Cauca. Por lo anterior, se analiza en este proyecto el proceso de cogeneración que se realiza en 12 ingenios y el proceso de producción de papel que realiza la empresa Carvajal Pulpa y Papel en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca.

Finalmente, se definió como objetivo general del proyecto: Evaluar la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca a partir del análisis del ciclo de vida; Y como objetivos específicos:

- ✓ Analizar el estado actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia.
- ✓ Aplicar un Análisis del Ciclo de Vida como instrumento para la evaluación ambiental del proceso relacionado con las dos alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia: Cogeneración de energía y producción de papel.
- ✓ Generar recomendaciones de sustentabilidad para las alternativas de aprovechamiento del bagazo de Caña de azúcar en el Valle del Cauca - Colombia.

# **1. MARCO REFERENCIAL**

El marco referencial del presente documento se divide en cuatro ítems que son: Marco teórico, marco conceptual, marco contextual y marco legal.

## **1.1 Marco Teórico**

A continuación se describen las metodologías que se aplicaron para evaluar la sustentabilidad del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. Para la dimensión Ambiental el Análisis de Ciclo de vida ACV, para la dimensión económica el Análisis de costos del ciclo de vida LCC, para la dimensión social el Análisis de los Stakeholders y finalmente la metodología que integra las tres dimensiones el Proceso Analítico Jerárquico AHP.

### **1.1.1 Análisis de Ciclo de Vida ACV**

El ACV es una herramienta que recopila y valora las entradas (materia y energía), salidas (productos, emisiones y residuos) e impactos potenciales de un sistema de producción o servicio a lo largo de su ciclo de vida (Icontec, 2007). Al cuantificar, cualificar y valorar los flujos de un sistema para evaluar los impactos, hace que esta sea una de las metodologías más precisas en el campo de la evaluación ambiental y un adecuado instrumento de apoyo en la toma de decisiones.

El ACV fue propuesto como instrumento de producción más limpia, formulado para lograr mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales, materias primas e insumos, y minimizar la generación de residuos, la contaminación y los riesgos ambientales (Icontec, 2007). Por el hecho de ser adoptado por la Organización Internacional para la

Estandarización (ISO), el ACV durante el tiempo que se ha aplicado ha aportado a la homogenización de métodos y procedimientos en favor de la gestión ambiental a nivel del sector productivo. En la Figura 1, se muestra el marco de análisis de ciclo de vida según esta organización.



**Figura 1. Marco del análisis de ciclo de vida Norma ISO 14040**

**Fuente:** (Icontec, 2007)

Una de las potencialidades del ACV es la posibilidad de cerrar y analizar el ciclo completo de un material, lo que se entiende como una visión sistémica de dicho material. Así, esta metodología considera todos los aspectos involucrados desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los productos. El ACV también es una buena herramienta para el diseño de estándares ambientales y para identificar dónde puede ser efectiva la participación de las autoridades ambientales (Sánchez & Cardona, 2007).

Existen cuatro formas de abordar los ACV que delimitan el sistema de estudio y facilitan el cumplimiento de objetivos propuestos (Niederl & Narodslawsky, 2004):

- ACV de la cuna a la puerta (cradle to gate): Estudia únicamente las fases de extracción de materias primas, transporte a fábrica y producción, el estudio se concluye cuando el producto se encuentre preparado para su uso.
- ACV de la cuna a la tumba (cradle to grave): Examina todas las etapas del ciclo de vida del producto desde la obtención de materias primas hasta la gestión de los residuos al finalizar su vida útil.

- ACV de la puerta a la puerta (gate to gate): Inicia cuando las materias primas están listas para entrar en el proceso que culmina con el producto terminado.
- ACV de la cuna a la cuna (cradle to cradle): Analiza todas las fases del ciclo de vida del producto, y además incluye la gestión de los residuos al final de la vida y su reutilización como materia prima que reinicia el ciclo.

La metodología del ACV consta de cuatro etapas que son: La definición de objetivos y alcance del estudio, el análisis de inventario y el análisis de impacto e interpretación.

En la definición de los objetivos y alcances del ACV, se describen las razones por las que se realiza el estudio y el uso de los resultados. En el alcance se definen aspectos como el sistema del producto a estudiar y sus funciones, la unidad funcional, los límites del sistema producto, los tipos de impacto y la metodología de evaluación de impacto, limitaciones y los requisitos de calidad de los datos (Acevedo Pabón, 2012).

En la siguiente etapa se realiza el análisis de inventario en donde se recopila la información para la elaboración de los balances de masa y energía. De aquí se definirán aspectos ambientales tales como emisiones, vertimientos, residuos sólidos, consumos de recursos, ruidos, radiaciones, olores, etc.

En la tercera etapa se realiza la evaluación del impacto del ciclo de vida, en donde se analiza el inventario cuantificando los impactos ambientales. Esta etapa contiene los siguientes pasos (Acevedo Pabón, 2012):

- Seleccionar y definir de las categorías de impacto potencial, de los indicadores de cada categoría y de los modelos de estimación.
- Clasificar los resultados del inventario a cada una de las categorías de impacto previamente seleccionadas.
- Modelar mediante factores de caracterización de los datos del inventario para cada una de las categorías de impacto. Cada categoría de impacto tiene una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría. La suma de las diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría.

En la cuarta y última fase del ACV se hace su respectiva interpretación en donde se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto. En esta fase se analizan las incertidumbres, se valora la calidad de los datos y se genera un informe con las conclusiones y las recomendaciones (Acevedo Pabón, 2012).

Dentro de los estudios que recientemente se han realizado sobre ACV en el bagazo de caña de azúcar se destacan, un ACV de la producción de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar (Grillo Renó, Silva Lora, Escobar Palacios, Venturini, & Almazan, 2011), un estudio que por medio del ACV analiza los beneficios ambientales que tiene la sustitución de talco por bagazo de caña de azúcar para el refuerzo de materiales compuestos de polipropileno (Luz, Caldeira-Pires, & Ferrao, 2010), un inventario del ciclo de vida de la cogeneración de electricidad a partir del bagazo en la industria azucarera de Sudáfrica (Mashoko, Mbohwa, & Thomas, 2013), una Evaluación de alternativas tecnológicas para la integración del bagazo de caña de azúcar en procesos de producción de biocombustibles sustentables (Ojeda, Ávila, Suárez, & Kafarov, 2011), la comparación de los procesos de segunda generación para la conversión de bagazo de caña a biocombustibles líquidos en términos de eficiencia energética a partir de un ACV (Petersen, Melamu, Knoetze, & Gorgens, 2015), y una crítica a los biocombustibles de segunda generación utilizando un ACV (Rethabile & Blottnitz, 2011). En Colombia se ha realizado ACV para comparar el impacto ambiental que generan los procesos que usan residuos de la industria de los biocombustibles como materias primas como el bagazo y el glicerol (Valencia Botero & Cardona Alzate, 2013). En dicho ACV se compara la eficiencia del bagazo frente a otro residuo de la industria de los biocombustibles en donde se concluyen que el bagazo de caña de azúcar genera menos gases efecto invernadero que el glicerol.

Estos antecedentes demuestran que el ACV es una herramienta eficaz para analizar los impactos ambientales que se generan a partir del bagazo de caña de azúcar, considerado por la industria azucarera colombiana como una materia prima fundamental para otros procesos industriales.

### 1.1.2 Análisis del Costo del ciclo de vida LCC

El LCC de un sistema se define como la suma de todos los costos incurridos durante su ciclo de vida, incluyendo los costos de adquisición y propiedad. El término costo del ciclo de vida se utilizó por primera vez en 1965 en un informe titulado “Life Cycle Costing en Equipo de Adquisiciones”, informe preparado por el instituto de gestión logística de Washington para la Secretaría de Defensa de Estados Unidos y desde ahí se han desarrollado gran cantidad de estudios que contribuyen a la construcción del término (Dhillon, 2010).

En un LCC se evalúa el costo de un activo a lo largo de su ciclo de vida. En este proceso se evalúan cuatro categorías que son: Inversión, operación, mantenimiento y los gastos de eliminación al final de la vida del producto (Luo, Voet, & Hupples, 2008). El LCC se refiere a la optimización de relación calidad-precio en la propiedad de los activos físicos, tomando en consideración todos los factores de costos relacionados con el activo durante su vida útil. La optimización del equilibrio entre los factores de costo dará el costo mínimo del ciclo de vida del activo. Con el proceso se puede estimar los costos sobre una base de toda la vida antes de tomar una decisión de compra de un activo de las distintas alternativas posibles (Senthil Kumaran, 2002).

En un LCC se define el costo de los elementos de interés y el de las estructuras a ser usadas, luego se estiman los costos y el costo del ciclo de vida de un producto es la suma de todos los fondos gastados desde su concepción y fabricación, a través de su operación y hasta el final de su vida útil. El LCC de un activo físico comienza desde que se consideró su adquisición y termina cuando queda fuera de servicio para su eliminación o redistribución, o empieza un nuevo LCC.

El LCC busca optimizar el costo de adquirir, poseer y operar los activos físicos durante su vida útil al tratar de identificar y cuantificar todos los costes significativos involucrados en el ciclo de vida, utilizando la técnica del valor presente. Con el LCC se cuantifican las diferentes opciones a fin de garantizar la adopción de la configuración óptima de activos. Permite el equilibrio entre los elementos de costo durante las fases de vida de los activos.

Los LCC se elaboran con diferentes fines dentro de los que se destacan el permitir evaluar opciones de inversión de manera más eficaz, considerar no sólo los gastos iniciales de capital sino el impacto de todos los costos dentro de las evaluaciones, para ayudar en la gestión eficaz de los proyectos terminados y para facilitar la posibilidad de elegir entre varias alternativas.

### **1.1.3 Teoría de los Stakeholders**

La teoría de los stakeholders propuesta por Richard Edward Freeman en su obra “Strategic Management: A Stakeholder Approach” en 1984, se ha convertido en la base para el estudio de la gestión estratégica empresarial. La teoría permite visualizar la empresa desde los diferentes actores que afectan y se afectan por las decisiones que se tomen, permite entender las relaciones que se generan entre estos, y por ende permite visualizar la responsabilidad social corporativa de las organizaciones (González Esteban, 2007).

Para efectos del presente trabajo, el análisis de la dimensión social se realizó haciendo un análisis de los grupos involucrados en el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Dicha metodología permite evaluar impactos sociales de cada uno de los procesos sobre los grupos de interés.

Teniendo en cuenta que en las últimas décadas, el rol de las empresas y organizaciones en la sociedad se ha enfocado hacia la globalización de los mercados y hacia la inclusión de las externalidades ambientales y sociales, la complejidad de las dinámicas entre las organizaciones y la sociedad ha cambiado, por lo que estas juegan un papel más importante que antes. De tal manera que ya se están interiorizando o se debe interiorizar el impacto económico, ambiental y social de sus actividades. En respuesta a estos cambios, cada vez más miembros o representantes de los diferentes grupos sociales afectados exigen estar informados, ser consultados y participar en las decisiones corporativas, lo que obliga a las empresas a consultar a distintos grupos de stakeholders (Krick, Forstater, Monaghan, & Sillanpaa, 2006).

*“El término inglés stakeholders se refiere a aquellas personas o grupos de personas que se ven afectados o se podrían ver afectados por las operaciones de una organización o*

*empresa. Esta definición no incluye a todos los que pueden tener una opinión sobre la empresa. Las organizaciones pueden tener muchos tipos de stakeholders cada cual con diferente nivel de involucración o compromiso y a menudo con intereses diferentes y en conflicto” (Krick, Forstater, Monaghan, & Sillanpaa, 2006).*

Al analizar los stakeholders se logra identificar el bienestar social de los actores relacionados con las organizaciones. En este proceso se identifican los grupos de interés, y se observan sus necesidades, para determinar su posición frente a la empresa. Por lo anterior se hace la revisión de tres aspectos fundamentales: Probabilidad de que cada grupo instale sus expectativas en la compañía, su poder y el impacto de sus expectativas en estrategias futuras (Harrison & John, 2002).

#### **1.1.4 Proceso Analítico Jerárquico AHP**

Esta metodología se ha usado para evaluar alternativas basándose en varios y diversos criterios de análisis, en donde se construye un modelo jerárquico para organizar la información respecto de un problema de decisión, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios y finalmente sintetizar. En la metodología AHP se formula el problema de decisión con sus respectivas componentes relevantes, objetivo general, criterios y alternativas (Acevedo Pabón, 2012).

Para el caso de estudio, el objeto es analizar las alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar; los criterios que participan en la toma de decisiones son las tres dimensiones de la sustentabilidad: ambiental, económico y social. Cada forma de aprovechamiento es evaluada en estos términos mediante el uso de unos subindicadores criterio.

A cada subíndice lo acompañan los pesos porcentuales para la evaluación criterio. Cada subindicador tiene una puntuación de 0 a 1, en donde 1 es la mejor calificación, cero la peor y las intermedias varían entre 0 y 1 como una función lineal. Luego se pondera con los pesos porcentuales para sacar la calificación criterio.

## **1.2 Marco Conceptual**

En el presente ítem, se desarrolla el concepto de sustentabilidad que es la base para el desarrollo e integración de las metodologías aplicadas para la presente evaluación y luego se relaciona con la importancia del bagazo como residuo del sector azucarero que ha sido señalado por estudios nacionales e internacionales como aquel de mayor potencial de cogeneración en Colombia por su disponibilidad de biomasa, en especial de bagazo. Este subproducto, derivado de procesos de cosecha y molienda de caña, constituye la fuente primaria de energía para la cogeneración (Asocaña, 2015).

### **1.2.1 Desarrollo histórico del concepto de sustentabilidad y visión latinoamericana**

El ambientalismo tomó fuerza en la década de los 60 como movimiento político y social debido a que logró posicionarse como tema de preocupación en el común de la gente y acuñarse en la mayoría de los discursos políticos, por medio de la publicación de textos ecológicos, informes de crecimiento de la población y por la masificación de productos “verdes” divulgados en los medios de comunicación (Reboratti, 2000). Es así como aparece el libro “La primavera silenciosa” catalogada por algunos historiadores como el documento crucial que condujo a la creación de los primeros movimientos ambientales y eje fundamental para la formulación de los Límites del crecimiento (Carson, 2010). Dicho estudio fue realizado por el Club de Roma en 1972 y concluyó que un crecimiento económico continuado llevaría a un colapso por acumulación de contaminación o por extinción de recursos (Meadows & Randers, 2004). En ese mismo año se desarrolló en Estocolmo Suecia, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Humano, la cual se convirtió en la primera cumbre mundial en tratar temas ambientales internacionales y producto de ésta, se creó el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA (Eschenhagen, 2006).

Evidentemente las perspectivas de la conferencia de Estocolmo 72, estaban puestas en los aspectos técnicos de la contaminación provocada por la industrialización, el crecimiento poblacional y la urbanización, por lo que la reunión tuvo un carácter

primermundista. La reunión dio lugar a avances importantes tales como la convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de flora y fauna CITES, 1973, la convención sobre los humedales de importancia internacional RAMSAR 1971, Convenios de Viena y Montreal sobre la protección de la capa de ozono, el convenio de Basilea, entre otros (Eschenhagen, 2006). Sin embargo, la preocupación de los países tercermundistas no era esta, sino estaba enmarcada en términos de problemas sociales encabezados por la pobreza: *"los ricos se preocupan del humo que sale de sus autos; a nosotros nos preocupa el hambre"* *"Las dos causas básicas de la crisis ambiental son la pobreza y el mal uso de la riqueza: los pobres del mundo son compelidos a destruir en el corto plazo precisamente los recursos en que se basan sus perspectivas de subsistencia en el largo plazo, mientras la minoría rica provoca demandas en la base de recursos que a la larga son insustentables, transfiriendo los costos una vez más a los pobres"*.

(Guimaraes, 1999).

Se concluye entonces que no es posible separar los temas ambientales de los económicos, por lo que aparece la tendencia del ecodesarrollo, la cual se basó en la búsqueda de nuevos estilos de desarrollo que estuvieran en función de las potencialidades de los ecosistemas, tomó como soporte las bases de la economía ecológica con las leyes de la termodinámica propuestas por Nicolas Gerogescu en 1971 (Delgado Ramos, 2011).

El discurso del *ecodesarrollo* fue cambiado rápidamente por el de *"desarrollo sostenible"* propuesto por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y el Desarrollo, dirigida por la noruega Gro Harlem Brundtland y cuyo documento *"Nuestro Futuro común"* generó un gran impacto en las esferas políticas. Su definición de desarrollo es: *"Está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, es decir, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. El concepto de desarrollo sostenible implica límites, no límites absolutos, sino limitaciones que imponen a los recursos del medio ambiente el estado actual de la tecnología y de la organización social y la capacidad de la biósfera de absorber los efectos de las actividades humanas-, pero tanto la tecnología como la organización social pueden ser ordenadas y mejoradas de manera que abran el camino a una nueva era de crecimiento económico (Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo, 1987)"*

Esta definición, adoptada políticamente en la conferencia de Río de Janeiro en 1992, ha suscitado una serie de interrogantes tales como: ¿Cómo se sabe lo que quieren las generaciones futuras?, ¿Cuál es el papel del Estado en este modelo de desarrollo?, ¿Es el mercado el adecuado motor del desarrollo sostenible?, ¿Cómo se dimensionan las necesidades?. La contradicción que se vivía entre la conservación y el crecimiento económico fue re-interpretado. En efecto, el marco ecológico que antes se entendía como un obstáculo insalvable para el crecimiento, pasó a ser una necesidad para asegurarlo. Mientras unos celebraban que el informe Brundtland ponía el acento en la conservación ambiental, otros se alegraban de la reconciliación con la economía del crecimiento. La oposición entre ecología y crecimiento desaparecería, y repentinamente la dimensión ambiental era un requisito más del progreso económico y del desarrollo.

La propia noción de límites se desvanecía elegantemente ya que en realidad no eran absolutos sino que podían modificarse a expensas de la organización social y la tecnología (Gudynas, Ecología, Economía y Ética del desarrollo sostenible, 2004).

A la par con los interrogantes sobre la relación entre ambiente y desarrollo propuesta por Brundtland, aparecen diferentes conceptos de sostenibilidad basados en factores determinantes como la disponibilidad y la sustituibilidad de los recursos (Gallopín, 2003): (a) en la **Sostenibilidad muy débil**, Los recursos y servicios naturales se pueden sustituir, por lo que la naturaleza se convierte en proveedora de recursos naturales y en sumidero de desechos del sistema económico; (b) en la **Sostenibilidad muy fuerte**, los recursos naturales no se puede sustituir por capital hecho por el hombre por lo que existirá una economía de estado estacionario; (c) La **Sostenibilidad fuerte** se enfoca hacia un sistema socioecológico total en donde los tipos de capital no son necesariamente sustituibles, pero se debe conservar cantidades de capital de tal manera que se pueda mantener en sus niveles actuales. (d) En la **Sostenibilidad débil**, los capitales se pueden sustituir sin controlar los niveles de reducción por lo que con frecuencia estrategias de desarrollo conducen a una reducción a algún tipo de capital. Se han hecho otras clasificaciones: Sostenibilidad débil y fuerte (Pearce & Atkinson, 1998), Sustentabilidad débil, fuerte, super fuerte, (Gudynas, 2004).

La discusión de la diferencia entre sustentable y sostenible se inicia desde el análisis etimológico de los dos términos: En inglés se utiliza indistintamente el vocablo “sustainable” que significa tolerar y soportar; por otro lado, la raíz latina del término sostenible es “sustinere” que significa sostener, mantener, sustentar (Leal, 2007). Diferentes autores latinoamericanos utilizan los dos términos indistintamente, sin embargo Enrique Leff hace referencia al enfoque “desarrollo sostenible” propuesto por la comisión Bundtland como un problema desde su origen por provenir de programas neoliberales que llevan el discurso ambiental hacia la ecologización de la producción y hacia una capitalización de la naturaleza. Por tanto, relaciona lo sostenible con la durabilidad del proceso económico mismo y lo sustentable con la internalización de las condiciones ecológicas de soporte del proceso económico. De la misma manera considera que los mecanismos de mercado no son capaces de realizar esta internalización ni resolver procesos de los tiempos ecológicos de productividad y regeneración de la naturaleza, de valores culturales y humanos, de criterios cualitativos que defiendan la calidad de vida (Leff, 2002). En conclusión, la sostenibilidad desconoce las condiciones ecológicas y las leyes de la termodinámica que si tenían en cuenta en las bases del ecodesarrollo; El desarrollo sostenible está diseñado para incorporar la naturaleza al capital, por lo que simplifica la complejidad de los procesos naturales y destruye las identidades culturales, por lo que se relaciona directamente con las características de la sostenibilidad débil.

El Desarrollo sustentable busca que los recursos ambientales sean potenciales para reconstruir lo económico mediante una nueva racionalidad productiva de la naturaleza, autonomías culturales y la democracia participativa (Leff, 2009). Esta visión es netamente latinoamericana por las características las problemáticas y del desarrollo que se busca en la región, por lo tanto, está relacionada con las bases de una sostenibilidad fuerte.

En el discurso de la sustentabilidad latinoamericana se retoma la economía ecológica, que resulta siendo una ecología humana en donde se analiza el comportamiento del hombre dentro de los ecosistemas con características especiales como: (a) La posibilidad de enormes diferencias en el uso (y degradación) de energía y materiales entre personas y entre territorios poblados por estas; (b) El hecho de que los individuos aún no nacidos tienen dificultades ontológicas para hacer sentir su presencia en el mercado actual, porque de esta manera no es posible el estudio de las preferencias porque la mayoría de

compradores potenciales no pueden acudir al mercado; (c) Se da nueva vigencia a la teoría del subdesarrollo porque trata el intercambio ecológicamente desigual entre productos de imposible o larga reposición y productos de rápida fabricación; (d) Cambia la ideología que propone un crecimiento económico con desigualdades y se enmarca en el utopismo ecológico igualitarista universal como “ideología apropiada” para la gente pobre del mundo (Martinez Alier, 2004).

La diferencia de la sustentabilidad entre países desarrollados y subdesarrollados también se puede evidenciar al validar la hipótesis de la curva de Kuznetz que originalmente plantea que el crecimiento económico y la desigualdad tienen una relación de “U” invertida, es decir, que la desigualdad aumenta con el crecimiento económico, alcanza un máximo, y luego comienza a caer a partir de un nivel crítico de ingreso (Catalán, 2013). Partiendo de la hipótesis anterior, se han desarrollado estudios en diferentes países validando la hipótesis para el deterioro ambiental y se afirma que, en el largo plazo, el crecimiento económico es beneficioso para el medio ambiente: a medida que la gente va acumulando riqueza, se encuentra mejor preparada para afrontar el daño ambiental provocado por el crecimiento económico. Los resultados obtenidos muestran que los países subdesarrollados se encuentran en la fase creciente de la curva, por lo que todo el crecimiento económico se está traduciendo en un mayor deterioro ambiental, que las posibilidades de llegar al punto de inflexión son lentas y que la teoría de “*crecer primero, limpiar después*” trae consecuencias muy negativas para el componente ambiental de la sustentabilidad, desafortunadamente no se puede negar la afinidad de los procesos de desarrollo con dicha teoría (Liu, 2012), (Correa Restrepo , Vasco Ramírez, & Pérez Montoya, 2005).

Finalmente, dentro de la discusión del desarrollo sustentable, es importante aclarar los términos “necesidades” y “satisfacciones” para lograr mejorar la calidad de vida de las personas. Las necesidades son finitas, pocas, clasificables y se basan en el ser, tener, hacer, estar: subsistencia, protección, afecto, entendimiento, participación, ocio, creación, identidad, libertad; todos los seres humanos tienen las mismas necesidades pero cada cultura elige la forma como las satisface: con vivienda, alimentación, vestuario, educación, salud. A partir del análisis de la forma de satisfacer las necesidades, aparecen las formas de pobreza: (a) De subsistencia: Cuando el ingreso, la alimentación y el techo son insuficientes, (b) De protección: cuando los sistemas de salud

son ineficientes o hay niveles elevados de violencia, (c) De entendimiento: cuando hay deficiente calidad de la educación, (d) De afecto: autoritarismo, opresión, relación de explotación con el medio ambiente natural, (e) De Identidad: Imposición de valores extraños (Max-Neef, Elizalde, & Hopenhayn, 2010) .

En conclusión, la forma de satisfacer las necesidades básicas de los países latinoamericanos tiene sus propias características, muy diferente a las de los países del norte y por lo tanto los indicadores cualitativos, se quedan cortos en mostrar las realidades de la región. Es por esto que la sustentabilidad se vislumbra como una oportunidad para mejorar una calidad de vida y el desarrollo como un proceso de expansión de las libertades reales de las que los individuos (Sen, 2000).

### **1.2.2 El Bagazo de caña de azúcar en Colombia**

*“El bagazo es el residuo del proceso industrial de fabricación del azúcar, siendo el remanente de los tallos de caña después de ser extraído el jugo azucarado que ésta contiene por los molinos del ingenio; se divide en bagazo integral (whole bagasse), y éste a su vez en médula o meollo (pith) y fibra verdadera (fiber)”* (Aguilar , Rodriguez, & Castillo, 2010). Para el caso de la caña de azúcar, un tercio de la energía solar que la caña de azúcar absorbe se transforma en azúcar, el resto corresponde a fibra vegetal compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen el bagazo y la paja de la caña de azúcar.

El bagazo se compone de aproximadamente 50% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 25% de lignina. Químicamente el bagazo contiene aproximadamente 50% de celulosa, 30% de pentosanos y 2,4% de cenizas. Debido a su bajo contenido de cenizas, el bagazo ofrece numerosas ventajas en comparación con otros residuos de cultivos como el de arroz y trigo que tienen 17,5% y 11% de cenizas respectivamente. De la misma manera, el bagazo de la caña de azúcar es un buen reservorio de energía solar gracias a sus altos rendimientos: aproximadamente 80 ton/ha en comparación con 1.2 y 2 ton/ha para el trigo, otras hierbas y árboles respectivamente) (Pandey, Soccol, Nigam, & Soccol, 2000).

Dentro de los usos más utilizados en la industria azucarera se encuentra la producción de bioenergía para la agroindustria de la caña. En la actualidad en la mayoría de plantas de bioetanol se utiliza gran cantidad del bagazo producido por los molinos de azúcar como combustible para calderas. La cogeneración de energía se define como una forma termodinámica de uso eficiente de la energía, capaz de cubrir completa o parcialmente las necesidades de electricidad de una fábrica (Moran & Shapiro, 2004).

Otro uso importante es la producción microbiológica de xilitol, que tiene propiedades interesantes para innumerables productos alimenticios, farmacéuticos y de cosmética; La mayor aplicación de este compuesto se encuentra en productos orales tales como pastas de dientes, gomas de mascar, enjuagues bucales, aerosol nasal, entre otros (De Freitas Branco, Dos Santos, & da Silva, 2011).

Una aplicación importante del bagazo ha sido la producción de proteína de alimento enriquecido para la alimentación del ganado. Aunque es un proceso costoso, las investigaciones continúan apostándole a estas nuevas tecnologías. Varios estudios sustentan que es rentable la coexistencia de la ganadería y la producción de caña de azúcar debido a la utilización del bagazo con proteínas y suplementos de minerales para la alimentación de las vacas, ya que se incrementa la producción de lácteos por lo que también puede contrarrestar indirectamente en cambio de uso del suelo (Egeskong, Berndes, Freitas, Gustafsson, & Sparovek, 2011).

El bagazo también se puede utilizar para la producción de etanol, sin embargo requiere grandes cantidades de enzimas de celulasa para la sacarificación. Como los procesos para la producción de celulasas son actualmente costosos, tales conversiones no son atractivas (Pandey, Soccol, Nigam, & Soccol, 2000). Sin embargo, con el aprovechamiento de la genética moderna y otros instrumentos, los costos pueden reducirse significativamente (Cardona, Quintero, & Paz, 2010).

La composición del bagazo hace que sea un ingrediente ideal para ser aplicado y utilizado como fibra de refuerzo en materiales compuestos para la creación de nuevos materiales que poseen propiedades físicas y químicas distintas, es el caso de la producción de pasta de papel (Meza, Sigoillot, Lomascolo, Navarro, & Auria, 2006).

El bagazo se utiliza también para la fabricación de productos verdes de alta calidad teniendo en cuenta su bajo costo de producción y a la disponibilidad en las plantas procesadores de azúcar. Un ejemplo exitoso es el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como la fabricación de bloques ecológicos para mampostería liviana (Moreno , Pozo , & Nájera, 2011).

Otras investigaciones han explorado los potenciales de la mezcla del almidón de tapioca y glicerol en materiales compuestos, o han mezclado gelatina almidón y agar para producir materiales de embalaje de artículos de mesa. La ceniza del bagazo y la ceniza de paja de la caña tienen la capacidad de reemplazar parcialmente al cemento y actuar como aditivos en la producción de bloques de hormigón y cenizas (Loh, Sujan, Rahman, & Das, 2013).

A pesar de tener tantas alternativas de aprovechamiento industrial del bagazo, existen restricciones de tipo económicas, de voluntad política y de visión, que impiden el desarrollo de estas tecnologías. Se hacen necesarias propuesta innovadoras que permitan encontrar las alternativas o la diversificación de alternativas más adecuada para lograr los mejores resultados económicos, ambientales y sociales. Esta diversificación debe formularse en función del volumen de los subproductos de tipo orgánico que se generan zafra tras zafra, de los elementos fisiológicos que constituyen la materia prima y de la composición física y química de los diferentes productos ya que estos ofrecen posibilidades de industrialización don diversas rutas físicas, químicas y biotecnológicas (Aguilar , Rodriguez, & Castillo, 2010).

El Bagazo ha sido aprovechado desde los inicios del sector azucarero colombiano como combustible natural para sus diferentes procesos. En los trapiches se ha aprovechado el calor generado por la quema del bagazo para la evaporación del jugo de caña y para la obtención de mieles ricas en azúcar que luego son solidificadas para la obtención de pan de azúcar (Asocaña, 2013). La quema tanto de la caña como el bagazo libera a la atmósfera monóxido de carbono CO, dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, metano CH<sub>4</sub>, hidrocarburos no metálicos NMHC y partículas menores de 10 micras PM10, sustancias que alteran el funcionamiento normal de los sistemas respiratorio, cardiovascular, reproductivo y neurológico.

Al respecto, en Colombia existe el Decreto 4296 de Diciembre de 2004, que reglamenta la actividad azucarera, de la misma manera las CARs son las entidades encargadas de expedir los permisos para efectuar las prácticas de quema (Ronderos & Palacios , 2010). A pesar de la inversión en sistemas de control de emisiones de material particulado de fuentes fijas como precipitadores electrostáticos, lavadores de gases y sistemas multiciclónicos, las emisiones por la quema del bagazo continúan siendo una preocupación para los ingenios azucareros.

Siendo la cogeneración la alternativa tecnológica de pequeña y mediana escala más atractiva por su eficiencia energética para la utilización del bagazo de caña de azúcar en la actualidad, Colombia ha encontrado barreras como distorsiones en los precios de la energía (entre energéticos y entre grupos de consumidores de energía eléctrica), altos costos de inversión inicial para equipos de generación a pequeña escala, altas tasas de rentabilidad esperadas por los industriales para invertir en un negocio diferente al suyo, altos costos de transacción para instalación de este tipo de proyectos, falta de líneas de crédito atractivas, ausencia de un marco legal y regulatorio adecuado para la operación de estos sistemas, debilidad en las capacidades técnicas requeridas y carencia de información sobre incentivos y mecanismos financieros (PNUD, Asocaña, Ministerio de Medio Ambiente, UPME, 2003).

En Colombia también se ha extendido el uso de tableros aglomerados de bagazo con los que se fabrican paneles de fibras que se utilizan como panelería ligera para divisiones interiores, puertas interiores, closets u estantes de cocina, revestimiento de paredes, etc.

La cenichada es el producto de mezcla de la cachaza, que es formada por los residuos que se obtienen en el proceso de clarificación del jugo de la caña durante la elaboración del azúcar crudo con las cenizas del bagazo, con las cenizas del bagazo. Este producto se usa como combustible en las calderas de los ingenios.

## **1.3 Marco Contextual**

El marco contextual se compone del marco sectorial en donde se presentan las características más importantes del sector azucarero en el país y el marco institucional en donde se reconocen las principales entidades encargadas de la industria azucarera colombiana.

### **1.3.1 Marco Geográfico y Sectorial**

Existen actualmente 12 grandes ingenios como se muestran en la figura 2, localizados en el Valle del Cauca, los cuales son los mayores productores de residuos de cosecha y de bagazo de caña del país. La producción de residuos de caña varía entre 46 y 50% de la producción total de caña (UPME, 2003).

En Colombia la producción de panela, azúcar y mieles a partir de la caña de azúcar se realizó de manera artesanal hasta comienzos del siglo XX, comenzando un proceso de tecnificación del proceso productivo debido al aumento de la demanda e instauración de ingenios azucareros, hasta llegar a la formación de 22 ingenios, de los cuales solamente subsistieron 13 ingenios azucareros situados en el valle del río Cauca en los departamentos de Risaralda, Cauca y Valle del Cauca (Yoshioka, Gutiérrez, & Arango, 2011).

En 1959 se funda la Asociación de Cultivadores de la Caña de Azúcar de Colombia – Asocaña, como entidad interlocutora y sin ánimo de lucro que representa los propósitos de los trece ingenios ante el Gobierno, entidades privadas, gremios y aún organismos internacionales (Asocaña, 2012).

Actualmente el sector produce azúcar, energía y alcohol; para el año 2015 la producción de azúcar fue de 2'354.723 millones de Toneladas métricas de azúcar a partir de 24'205.089 millones de toneladas de caña (Asocaña, 2016).



**Figura 2. Ubicación espacial de los ingenios azucareros en el Valle del Cauca**  
**Fuente: La Región Azucarera de Colombia (Cenicaña, 2015), (Asocaña, 2016)**

Finalmente Colombia, después de Brasil es el segundo país líder en la producción de bioetanol con 456.403 miles de litros al finalizar el 2015, destinados al programa de cubrimiento nacional de oxigenación de gasolina, el cual consiste en la mezcla de 10% etanol y 90% gasolina- E10 (Asocaña, 2016).

Dentro de la economía nacional y regional, el sector aporta el 1% del PIB total, el 3% del PIB Industrial y el 4% del PIB Agrícola, mientras que para la región, estas cifras corresponden a 6%, 12% y 47%, respectivamente. El sector azucarero generó para el 2015 188.000 empleos directos e indirectos y si se tiene en cuenta la composición

demográfica de las familias como 4 personas por núcleo familiar según las estadísticas del Departamento Administrativo Nacional de Estadística- DANE, se deduce que más de un millón de personas dependen de la actividad azucarera, algo así como el 30% de la población del Departamento del Valle del Cauca y el 2.4% de la colombiana (DANE, 2005) (Franco & Correa , 2009) (Asocaña, 2016).

### **1.3.2 'Marco Institucional**

El sector azucarero colombiano cuenta con 14 ingenios, el ingenio Central Sicarare ubicado en el departamento del cesar y otros trece ingenios ubicados en Cauca, Valle del Cauca y Risaralda; se ubican en esta región del país debido a que posee las condiciones idóneas para el crecimiento de la caña de azúcar: brillo solar permanente e intenso a lo largo del año, caída adecuada de temperatura entre el día y la noche, disponibilidad de agua, lluvias adecuadas y fertilidad en los suelos.

Los trece ingenios ubicados en el valle geográfico del río Cauca son: Carmelita, Castilla, Central Tumaco, Incauca, La Cabaña, Manuelita, María Luisa, Mayüez, Pichichí, Providencia, Riopaila, Risaralda y San Carlos. Los cuales son representados por Asocaña desde 1959; Siendo esta entidad la encargada de representar al sector azucarero a nivel nacional e internacional, coordinar las posiciones del sector azucarero en las negociaciones internacionales que lleva a cabo el gobierno, coordina proyectos sectoriales, elabora informes azucareros especializados, brinda asesoría a afiliados en temas económicos, de mercados, ambientales, informática, sociales y jurídicos, apoya la elaboración y ejecución de políticas ambientales y sociales del sector azucarero y administra el Fondo de Estabilización de Precios del Azúcar.

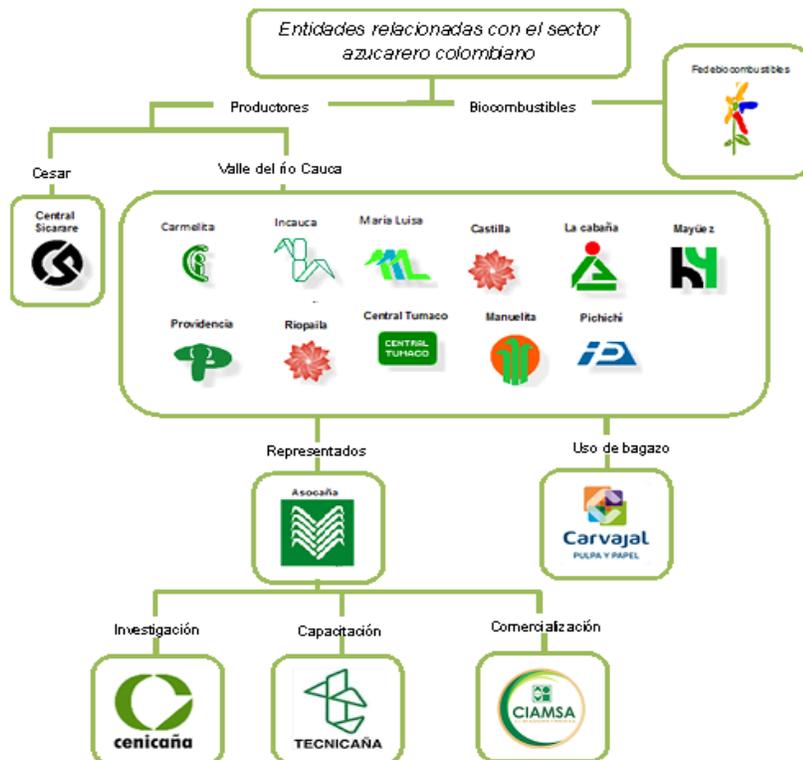
Además de Asocaña, el sector azucarero ha conformado otras instituciones dedicadas a labores especializadas en temas de investigación, capacitación y comercialización internacional de azúcar como lo son:

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia – Cenicaña fundado en 1977 y encargado de desarrollar programas de investigación en variedades, agronomía y procesos de fábrica, presta servicios de apoyo en análisis económico y estadístico, información y documentación, tecnología informática, cooperación técnica, transferencia de tecnología, análisis de laboratorio, administra las estaciones de la red meteorológica

automatizada y mantiene actualizada la cartografía digital del área cultivada; La Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar – Tecnicaña Encargada de fortalecer a todos los profesionales y técnicos de las entidades asociadas mediante la capacitación y transferencia de tecnología y Comercializadora Internacional de Azúcares y Mieles S.A. – Ciamsa cuya función es realizar la comercialización y operación logística de cerca de 1 millón de toneladas de azúcares y mieles exportadas al año (Asocaña, 2012).

Por otra parte Fedebiocombustibles, es otra entidad que se relaciona con el sector azucarero debido a que contribuye con la implementación de biocombustibles en Colombia y el desarrollo de energías alternativas, limpias y eficientes, teniendo aplicación en el desarrollo de bioetanol a partir de la caña de azúcar y cogeneración a partir del bagazo de caña de azúcar.

Finalmente Carvajal Pulpa y Papel es otra de las industrias colombianas relacionadas con el sector azucarero teniendo en cuenta que es la única empresa de Colombia que produce papel 100% de bagazo de caña de azúcar.



**Figura 3. Entidades relacionadas con el sector azucarero colombiano**

Fuente: (Buitrago & Pinto, 2015).

## 1.4 Marco Legal

En la tabla 1 se describe la legislación vigente relacionada con el tema de estudio.

**Tabla 1:**  
**Marco legal del proyecto**

| LEGISLACION   | EXPIDE                          | OBJETO  |
|---|---------------------------------|---|
| Constitución Nacional de 1991                             | Asamblea Nacional Constituyente | Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para el desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.  |
| Ley 629 de 2001   | Congreso de la República        | Mediante el cual Colombia ratifica el protocolo de Kyoto.   |
| Ley 1715 de 2014  | Congreso de la República        | La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. |
| Ley 788 de 2002   | Congreso de la república        | Por el cual se expiden en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones.   |
| Dec. 1073 de 2015   | Ministerio de Minas y Energía   | Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía.   |
| Dec. 2143 de 2015   | Ministerio de Minas y Energía   | Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.   |
| El Código de Recursos Naturales, Decreto-Ley 2811 de 1974 | Congreso de la República        | El artículo 9. trata el tema de la sostenibilidad ambiental en las fases de planificación y ejecución.  |
| Ley 99 del 1993   | Congreso de la República        | En el Artículo 116, literal g, autoriza el Presidente de la República para establecer un régimen de incentivos, que incluya incentivos económicos para el adecuado uso y aprovechamiento del medio ambiente y de los recursos renovables, para su recuperación y conservación en los ecosistemas por parte de propietarios privados.  |
| Ley 693 de 2001   | Congreso de la República        | Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción comercialización y consumo, con otras disposiciones.  |
| Ley 697 de 2000   | Congreso de la República        | Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve el uso de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.   |

| LEGISLACION  | EXPIDE  | OBJETO   |
|--|---|--|
| Ley 788 de 2002  | Congreso de la República                                | Por la cual se introdujo las exenciones del IVA, impuesto global y sobretasa al componente alcohol de los combustibles oxigenados, pero además en la misma ley, el Gobierno Nacional hizo introducir las exenciones arancelarias para la importación de los equipos necesarios para el montaje de refinerías de alcohol carburante, mejoramiento de los cultivos y de la infraestructura.  |
| Ley 1215 de 2008   | Congreso de la República                                | Por la cual se adoptan medidas en materia de generación de energía.  |
| Dec 2041 de 2015<br>Incorporado en el Decreto 1076 de 2015. "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible". | Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible             | Concepto y alcance de la licencia ambiental. La licencia ambiental es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables, o al medio ambiente, o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta al beneficiario de esta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada. |
| Dec 383 de 2007  |   | Se establecen estímulos para la implementación de zonas francas para proyectos agroindustriales en materia de biocombustibles-tasa de renta diferencial y beneficios en materia de exenciones.   |
| Dec. 2629 de 2007  | Ministerio de Minas y Energía                           | Normas motores para el uso de alcohol carburante en mezclas superiores al 10% para el año 2012   |
| Res. 898 de 1995   | Ministerio Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial | Por el cual se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores.  |
| Res. 180687 de 2003  | Ministerio de Minas y Energía                           | Ministerio de Minas y Energía  |
| Res 415 de 2004  | Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) | Pro la cual se otorga una licencia ambiental para una inhalación y operación de una planta de destilación de alcohol anhidrido en terrenos del ingenio providencia, jurisdicción del municipio del cerrito.  |
| Resolución 181708 de 2004  | Ministerio de Minas y Energía                           | Modifico el artículo 5 de la resolución 180687 del 17 de junio de 2003. art. 5. a más tardar del 27 de diciembre del año 2005 las gasolinas que se distribuyan a través de las plantas de abasto mayorista deberá contener alcoholes carburantes en los porcentajes y calidades establecidas en la presente resolución   |
| Res. 1565 de 2004 modificada por la resolución 2200 de 2005 y por la 1180 de 2006  | Ministerio Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial | Calidad del alcohol carburante anhidrido combustible, alcohol carburante combustible desnaturalizado, gasolinas básicas y gasolinas oxigenadas.  |
| Res 181088 de 2005   | Ministerio de Minas y Energía                           | Por la cual se definió un predio de 3.906,88 pesos por galón de alcohol carburante en puerta de refinería (equivalente aproximadamente a 1.7 dólares pro millón) como un elemento coadyudante adicional ha establecido una garantía de compra para los productores de alcohol carburante por parte de los distribuidores mayoristas.   |

| LEGISLACION  | EXPIDE   | OBJETO  |
|--|--|---|
| Res 180836 de 2003   | Ministerio de Minas y Energía  | Para establecer la estructura de los precios de la gasolina motor corriente oxigenado, asegurando la estabilidad para los productores de alcohol combustible, dándole a la industria todo el marco legal necesario para su conveniente desarrollo en todas las regiones colombianas |
| Res 0447 de 2003   | Ministerio Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial<br>Ministerio de Minas y Energía | Por la cual se modifica parcialmente la resolución 898 del 23 de agosto de 1995, y reglamenta localidad de alcohol carburante y de las gasolinas oxigenadas. Establece las normas en las que debe ceñirse el uso de aditivos en las gasolinas de Colombia.                          |
| Res 180259 de 2007   | Ministerio de Minas y Energía  | Por la cual se modifica la resolución 82438 del 23 de dic de 1998 y se establecen disposiciones relacionadas con la estructura de precios de la gasolina motor corriente y gasolina motor corriente oxigenada.  |
| Res 180222 de 2006   | Ministerio de Minas y Energía  | Por la cual se define una banda de precios que toma un valor mayor entre un precio estabilidad de \$ 4.594 pesos por galón para el alcohol carburante, también se reconoce los costos de oportunidad de las materias primas que se utilizan en la producción de etanol.             |
| Res 180158 de feb 2 de 2007  | Ministerio de Minas y Energía  | Por la cual se determinan los combustibles limpios de conformidad con lo consagrado en el parágrafo del artículo 1 de la ley 1083 de 2006   |
| Norma técnica colombiana NTC 5308 de 2004                                | ICONTEC  | Alcohol carburante anhídrido combustible desnaturalizado, obtenido a partir de biomasa, para mezclar con gasolinas motor, empleado como combustible en vehículos con motores de combustión interna encendido por chispa.  |
| Dec 2629 de 2007   | Ministerio de Minas y Energía  | Por medio del cual se dictan disposiciones para promover el uso de biocombustibles en el país así como medidas aplicables a los vehículos y demás artefactos a motor que utilicen combustibles para su funcionamiento   |
| Dec 3930 de 2010, modificado por el Dec. 4748 de 2010                    | Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial                          | Por medio del cual se reglamenta parcialmente el título 1 de la ley 9 de 1979 y el capítulo 2 de la ley 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.  |
| Dec 3100 de 2003, modificado por el Dec. 3440 de 2004 y Dec 2570 de 2006 | Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial                          | Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa de agua como receptor de los vertimientos puntuales.  |
| Dec 00155 de 2004  | Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial                          | Por medio del cual se reglamentan las tasas por utilización de aguas  |
| Resolución 909 de 2008   | Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial                          | Normas y estándares admisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas   |

Fuente: Elaboración propia, 2015



## 2. MARCO METODOLÓGICO

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se desarrollaron tres fases en función de los objetivos específicos propuestos.

En la **fase 1**, se elaboró un diagnóstico del estado actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca enmarcado en las dimensiones ambiental, económica y social (Capítulo 3).

En la **fase 2**, para evaluar la dimensión ambiental, se aplicó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a los dos tipos de aprovechamiento del bagazo que son cogeneración de energía y producción de papel (Capítulo 4).

En la **fase 3**, Se incorporaron al ACV que evalúa la dimensión ambiental, dos metodologías que evalúan las dimensiones económica y social. Para evaluar la dimensión económica de los dos tipos de aprovechamiento, se aplicó un Análisis de Costos del Ciclo de Vida (LCC). Luego, para evaluar la dimensión social, se aplicó un Análisis de los stakeholders nuevamente para los dos tipos de aprovechamiento. Seguidamente, se integraron los resultados de las tres dimensiones en un indicador de sustentabilidad mediante la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la cogeneración de energía y la producción de papel (Capítulo 5).

Finalmente se proponen recomendaciones de sustentabilidad a partir del APH (Capítulo 6).

En la tabla 2, se presenta el marco metodológico utilizado para el desarrollo de la investigación.

**Tabla 2:**  
**Marco metodológico**

| OBJETIVO ESPECÍFICO   | ACTIVIDADES   |
|---|---|
| Analizar el estado actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia.  | Recopilar documentación existente en varias instituciones, estatales y privadas sobre variables sociales, económicas y ambientales. |
|   | Revisión de libros, publicaciones y otros documentos relacionados con variables sociales, económicas y ambientales.                 |
|   | Reuniones y entrevistas con expertos nacionales e internacionales.  |
|   | Elaboración del diagnóstico del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar sobre variables sociales, económicas y ambientales.    |
| Aplicar un Análisis del Ciclo de Vida como instrumento para la evaluación ambiental del proceso relacionado con el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia utilizando el software SIMAPRO | Definición del objetivo y alcance del estudio   |
|   | Análisis del inventario del ciclo de vida: Identificar los procesos, diagramas de flujo del proceso, balance de masas y energía.    |
|   | Selección de categorías: Revisión Bibliográfica   |
|   | Evaluación del impacto ambiental con la metodología de ACV  |
| Generar recomendaciones de sustentabilidad para las alternativas de aprovechamiento del bagazo de Caña de azúcar en el Valle del Cauca Colombia.  | Aplicación del Análisis económico con la metodología LCC  |
|   | Aplicación del análisis social con la metodología de análisis de Stakeholders   |
|   | Desarrollo de un Indicador de sustentabilidad a partir de la metodología Procesos Analítico Jerárquico AHP                          |
|   | Propuesta de recomendaciones de sustentabilidad   |

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Teniendo en cuenta que un ACV es un instrumento para evaluar los impactos ambientales de un proceso, las recomendaciones de sustentabilidad se enmarcaron en la inclusión de las dimensiones económica y social al ACV. Por esta razón las actividades del tercer objetivo incluyen estas dos dimensiones, para finalmente unir las al ACV por medio del desarrollo de un indicador de sustentabilidad, que incluye las tres dimensiones.

Los instrumentos metodológicos que se utilizaron para la realización del documento, se presentan a continuación para cada fase.

## 2.1 Fase 1: Diagnóstico de la situación actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar

Para poder recopilar documentación existente en varias instituciones, estatales y privadas sobre variables sociales, económicas y ambientales se realizaron dos visitas a las entidades encargadas del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Se visitaron y entrevistaron profesionales de las entidades listadas en la tabla 3.

**Tabla 3:**  
**Entidades visitadas**

| Entidad                | Observaciones  |
|------------------------|--|
| ASOCAÑA                | Se recogió información de variables económicas, ambientales y sociales e informes de sostenibilidad. Contacto: David Loaiza  |
| CENICANA               | La entidad ofreció sus servicios de biblioteca, de donde se obtuvieron datos necesarios para el balance de masas y energía. Contactos: Ing. Santiago Ordúz, Ing. Nicolás Gil, Ing. David Palacios. |
| CVC                    | Se consultó alguna información relacionada con el uso de los recursos, emisiones y vertimientos. Ing. Sandra Isaza.  |
| Carvajal Pulpa y Papel | Se realizó visita técnica para reconocer los procesos de la producción de papel. Contacto: Ing. Hernán Vidal   |
| Ingenio Manuelita      | Información relacionada con los procesos industriales de la entidad. Contacto: Ing. Doris Ríos.  |
| Otros Ingenios         | Informes de sostenibilidad y visitas a oficinas administrativas.   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Para obtener la información requerida por el ACV, el LCC y el análisis de stakeholders, fue necesario realizar la revisión de libros, publicaciones y otros documentos relacionados con variables sociales, económicas y ambientales. De la misma manera se hizo revisión de las bases de datos Science Direct y Scopus.

Como resultado, se obtuvo el diagnóstico de la situación actual del aprovechamiento de caña de azúcar haciendo énfasis en la descripción de cada uno de los procesos y en el análisis de los aspectos más relevantes de cada una de las dimensiones de la sustentabilidad.

## 2.2 Fase 2: Análisis del Ciclo de Vida del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca – Colombia

Para el desarrollo del ACV del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, se tuvo en cuenta lo estipulado en la norma NTC ISO 14040 y NTC ISO 14014 (ICONTEC, 2007) para desarrollo de ACV, por lo que inicialmente se definió el objetivo y alcance del estudio, luego se realizó un análisis de inventario, seguidamente se seleccionaron las categorías y finalmente se realizó la evaluación del impacto ambiental. A continuación se describen cada una de estas subfases.

### 2.2.1 Objetivo y alcance del ACV

Para la elaboración los balances de materia y energía se tomó como base la producción anual de caña de azúcar y el bagazo correspondiente a los ingenios del Valle del Cauca como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 4:**  
**Cifras anuales asociadas al sistema en KToneladas**

| Insumo  | Cantidad |
|---|----------|
| Caña de azúcar producida por los ingenios del Valle del Cauca           | 21.000   |
| Bagazo de caña de azúcar producida por los ingenios del Valle del Cauca | 6.000    |
| Bagazo destinado a cogeneración de energía en los ingenios (85%)        | 5.100    |
| Bagazo destinado a la producción de papel (15%)                         | 900      |

Fuente: (Asocaña, 2012)

Teniendo en cuenta que se parte de la producción anual de bagazo de caña de azúcar producido en el Valle de Cauca, la unidad funcional que se trabajó para el presente estudio es KToneladas de bagazo aprovechadas en un año y los límites considerados fueron los siguientes:

- Límites geográficos: El ACV realizado se limita a la transformación del bagazo de caña de azúcar generado por los ingenios en el Valle del Cauca – Colombia

- Límites temporales: 1 año de transformación de bagazo. La información que incluye el análisis se encuentra desde el año 2010
- Límite espacial: Se utiliza el enfoque de la *puerta a la puerta*, es decir, desde la extracción de la materia prima, hasta la entrega del producto generado por los procesos de transformación del bagazo.
- Etapas excluidas: No se tendrá en cuenta los usos de los productos de la caña de azúcar como azúcar y etanol, ni su reutilización o reciclaje. De la misma manera los impactos ambientales relacionados con la fabricación y mantenimiento de maquinarias e infraestructura necesaria para el cultivo de caña de azúcar, la producción de fertilizantes y herbicidas. Lo anterior en razón a que el producto analizado en este trabajo no es la caña de azúcar como tal, sino el bagazo como objeto de estudio.

## 2.2.2 Análisis de Inventario

En el análisis de inventario se elaboraron los balances de masa y energía de cada uno de los procesos y posteriormente se ingresaron al software especializado SIMAPRO versión 8.0.5.13.

El sistema del producto es el conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto (Icontec, 2007). Teniendo en cuenta que en la actualidad existen dos formas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar que son la producción de papel y la cogeneración, en el sistema del producto se describen los procesos unitarios que hacen parte del sistema analizado.

Teniendo en cuenta que el bagazo es un subproducto del procesamiento de la caña de azúcar, éste es la materia prima a analizar en este trabajo, puesto que la finalidad es analizar las dos alternativas de aprovechamiento que se usan en la actualidad en el Valle del Cauca. De tal manera que el Análisis de Ciclo de Vida se considera de tipo “gate to

gate” conocido como puerta a puerta, ya que inicia cuando las materias primas están listas para entrar en el proceso que culmina con el producto terminado.

La información que describe cada proceso unitario fue obtenida de la visita de campo realizada a las instalaciones de Carvajal Pulpa y Papel en Yumbo, de fuentes institucionales entre las que se destacan las guías ambientales de asocaña para el proceso de fábrica (Asocaña, 2002), informes de sostenibilidad de Asocaña del 2009 al 2013, página web de Cenicaña, de datos de tesis de grado realizadas en el sector dentro de las que se destacan una pasantía realizada en Carvajal Pulpa y Papel (Gomez Londoño, 2012), Trabajos de grado del proyecto de Colciencias “Optimización del proceso dual de Producción Simultánea (Azúcar – Alcohol) y desarrollo de los nuevos procesos de producción de bioetanol combustible (Acevedo Pinzón, 2009), y artículos de revistas científicas.

Todos los cálculos se basaron en una unidad funcional como lo exigen la norma ISO 14040, que para el presente estudio corresponde a la cantidad de KTon de bagazo aprovechadas en un año.

Las entradas y salidas másicas y de energía fueron incluidos en el software para cada uno de los procesos unitarios del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Las características de las materias primas y servicios utilizados fueron seleccionadas del software en función de su similitud con las entradas reales. En la tabla 4 se muestran las características principales de cada insumo utilizado.

**Tabla 5:**  
**Características más importantes de los insumos utilizados en el software**

| Insumo          | Características   |
|-----------------|---|
| Caña de azúcar: | <p><b>“Sugar cane, at farm/BR Mass”</b></p> <p>Este proceso describe la producción anual promedio de la caña de azúcar en una hectárea en una granja típica en Brasil. Los límites del sistema de este proceso son de la puerta de la granja a la puerta de la granja. Actividades consideradas incluyen el uso de fertilizantes, el uso de diesel para las prácticas de gestión de campo. Los flujos elementales incluyen las emisiones de campo al aire y el agua, el cambio directo del uso del suelo, uso del agua y las emisiones debidas al uso de plaguicidas. Los cultivos múltiples, bienes de capital, la producción de plaguicidas, la producción de semillas no están incluidos. El Total de NPK (contados como kg N, kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O kg equivalentes) de aplicación por hectárea de fertilizantes sintéticos = 55 - 115 – 135. El total de NPK (contados como kg N, kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O kg equivalentes) por Ha a partir de estiércol animal es = 41 - 26,56 a 33,49. Los rendimientos de los cultivos se derivaron de 2005-2009 estadísticas de la FAO (FAOSTAT, de la FAO, 2013). El uso de energía se calculó con base en los datos obtenidos de la MEBOT herramienta de simulación de granja (Schreuder, Dijk, Asperen, Boer, y Schoot, 2008). Las</p> |

| Insumo             | Características   |
|--------------------|---|
|                    | Cantidades específicas de fertilizantes se calculan sobre la base de las necesidades de nutrientes específicos de los cultivos y la mezcla de fertilizante específico del país derivadas de la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA) Estadísticas (IFA, 2012). El estiércol animal se aplica para el mantenimiento del suelo en base a la metodología descrita en el apéndice 4 de Vellinga et al. (2013). Las emisiones de metales pesados debido a estiércol y la aplicación de fertilizantes artificiales se han calculado en base a una metodología adaptada de Nemecek y Schnetzer (2012). Se está tomando en cuenta el equilibrio de metales pesados en función de la deposición, el uso de fertilizantes y cultivos absorción usando la literatura referente a los contenidos de metales pesados en el estiércol (Römkens y Rietra, 2008) y en los fertilizantes (Mels, Bisschops, y Swart, 2008). El uso del agua se basa en la huella de "agua azul" (Mekonnen y Hoekstra, 2010). El Uso de la tierra se calculado utilizando "Herramienta de evaluación directa Uso de la Tierra Cambio (Versión 2014,1-21 01 2014)" (Blonk consultores, 2014). Las tasas de aplicación de plaguicidas fueron tomados de un gran volumen de fuentes bibliográficas. |
| Agua de acueducto  | <b>"Water Tap"</b><br>Read meta-data at <a href="http://www.lcafood.dk/database">http://www.lcafood.dk/database</a> . Base de datos: Ecoinvent 3  |
| Agua suavizada     | <b>"Water completely softened"</b><br>Agua suavizada, descarbonizada. Base de datos: Ecoinvent 3  |
| Dióxido de Cloro   | <b>"Chlorine dioxide"</b><br>Base de datos: Ecoinvent 3   |
| Hidróxido de sodio | <b>"Sodium hidroxide"</b><br>Este proceso describe la producción de hidróxido de sodio en Europa. Las actividades incluidas son entradas de hidróxido de sodio a partir de las tecnologías de membrana, de amalgama y de diafragma. El mix de producción actual se ha derivado de las estadísticas de producción que fueron publicados por el Eurochlor, (Eurochlor, 2012).   |
| Cal                | <b>"Lime (GLO) market for"</b><br>Base de datos: Ecoinvent 3  |
| Vapor              | <b>"On-site steam average E"</b><br>Vapor de producción en hotel, por kg. \ Casi todos los procesos químicos necesitan vapor. Normalmente esto se genera en el sitio, pero también puede ser comprado de un generador de cerca. Los combustibles utilizados para la producción de vapor varían ampliamente desde el lignito de bajo grado con el gas natural, el hidrógeno, la energía hidráulica o de vez en cuando los productos de desecho del proceso de producción en sí. Si el vapor de sitio se utiliza la producción en un proceso y los datos son conocidos, se utilizan los datos específicos del sitio. Este conjunto de datos promedio sólo se utiliza si no hay datos sobre la producción de vapor establecimiento.  |
| Energía            | <b>"Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer&lt;1kV/BR Energy"</b><br>Este proceso describe la producción de electricidad en Brasil. La mezcla de rejilla se compone principalmente de energía hidroeléctrica (81%). También algunos biocombustibles (6%), gas natural (5%), aceite (3%), carbón (2%) y viento (1%) se utilizan para producir electricidad. Los datos sobre las mezclas de producción para la producción de electricidad se toman de la Agencia Internacional de Energía (AIE): <a href="http://www.iea.org">http://www.iea.org</a> . Para la producción de electricidad a partir de biocombustibles, los residuos, la energía solar, la geotérmica y la marea se asume que no hay impacto ambiental. El balance energético es corregido por las pérdidas que se producen, según lo informado por la AIE.  |

Fuente: Elaboración propia a partir de software SIMAPRO, 2015

### 2.2.3 Selección de categorías de impacto

Para el presente estudio se utilizó el método EPD (2013) contenido en el software, el cual se basa en el procedimiento de caracterización para calcular la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada.

Con el método EPD (2013), cada intervención ambiental se asocia con las categorías de impacto en las que tiene un efecto, y luego cuantifica los impactos ambientales utilizando factores de equivalencia. Este método de evaluación de impactos es uno de los más importantes y actualizados que utiliza el software SIMAPRO; es utilizado por el Consejo de Gestión Ambiental de Suecia (SEMC) para la declaración de productos ambientales.

Para la selección de las categorías de impacto, se hizo un análisis de los aspectos ambientales implicados en los procesos tales como la emisión de gases en la cogeneración, los vertimientos, el consumo de agua y productos químicos en la producción de papel. De manera complementaria, con la revisión bibliográfica de estudios sobre biocombustibles se pudo evidenciar que las categorías de impacto más significativas son: Calentamiento global, acidificación, agotamiento abiótico, eutrofización y toxicidad humana, debido a que abarcan preocupaciones en cuanto a la salud, los ecosistemas y los recursos (Petersen, Melamu, Knoetze, & Gorgens, 2014), (Mu, Seager, Rao, & Zhao, 2010), (Buddadee, Wirojanagud, Watts, & Pitakaso, 2008), (Luo, Van de Voet, & Huppel, 2009) (Niederl & Narodoslowsky, 2004).

Para el presente estudio se seleccionaron las siguientes categorías de impacto: Acidificación, Eutrofización, Calentamiento Global, Oxidación Fotoquímica, Deterioro de la capa de Ozono y Deterioro Abiótico que se analizaron bajo la metodología EPD (2013) contenida en el software SIMAPRO.

Las anteriores versiones de EPD tenían información de las categorías de impacto: acidificación, eutrofización, calentamiento global y oxidación fotoquímica. La versión utilizada para el presente estudio incluye agotamiento de la capa de ozono y agotamiento abiótico.

Cada categoría de impacto se expresa en un factor de caracterización en Kilogramos equivalentes de una especie química representativa que genera el impacto. En la tabla 5

se muestran las categorías de impacto utilizadas y su respectivo factor de caracterización.

**Tabla 6:**  
**Categorías de Impacto de la Metodología EPD (2013)**

| Nombre de la categoría en SimpaPro | Factor de Caracterización           |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Acidificación                      | Kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofización                      | Kg PO <sub>4</sub> eq               |
| Cambio Climático                   | Kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Oxidación Fotoquímica              | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Deterioro de la capa de ozono      | Kg CFC-11 eq                        |
| Deterioro Abiótico                 | Kg Sb eq                            |

Fuente: (PRé, 2015)

## 2.2.4 Evaluación Ambiental con el software SIMAPRO

La evaluación del impacto ambiental es la fase que evalúa la importancia de los impactos ambientales y que permite conocer el perfil de dichos impactos. A partir del análisis de inventario que se ingresó previamente al software SIMAPRO de cada uno de las etapas de los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, cogeneración de energía y producción de papel, se obtuvo la evaluación Ambiental con las categorías de Impacto seleccionadas en el numeral anterior.

Luego de aplicar la evaluación en el Software SIMAPRO, se obtuvieron los árboles de contribución de impactos ambientales para cada una de las categorías de impacto y para cada tipo de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.

Con los resultados de los árboles de contribución se identificó el aporte de cada categoría de impactos en cada una de las etapas para utilizar 1000 ton/año de bagazo de caña de azúcar.

Con esta información se calculó el porcentaje de participación que tiene cada una de las etapas consideradas en el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en las diferentes categorías de impacto y se plasmó en los gráficos de perfiles medioambientales de cada tipo de aprovechamiento.

## **2.3 Fase 3. Inclusión de las dimensiones económica y social al Análisis del Ciclo de Vida**

En esta fase se integraron al ACV la dimensión económica y social, para analizar la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. A continuación se describen los instrumentos utilizados para implementar las metodologías.

### **2.3.1 Metodología Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC**

Los pasos que se describen a continuación fueron los utilizados para aplicar la metodología de análisis de costos del ciclo de vida y fueron extraídos de la metodología propuesta de David Woodward (Senthil Kumaran, 2002).

Paso 1. Definición del costo de los elementos de interés: son todos los flujos de efectivo que se producen durante la vida útil del activo desde la adquisición hasta su eliminación al final de su vida útil.

Paso 2. Definición del costo de las estructuras a usar: Pueden ser costes del uso, la propiedad y la administración, o se pueden tomar como los costos de la ingeniería, la fabricación, la distribución, los costos del servicio, los costos de ventas y renovación.

Paso 3. Establecer la función de estimación de costos: Es una expresión matemática que describe, para los propósitos de estimación, el costo de un elemento o actividad en función de una o más variables independientes. Los Costos Históricamente recopilados serán la base de dichas estimaciones, utilizando funciones lineales, parabólicas, hiperbólicas, etc.

Paso 4. Aplicar la metodología adecuada para evaluar el activo la cual tiene las siguientes fases:

(i) Establecer el perfil operativo: Describe el ciclo periódico a través del cual el equipo va a estar en funcionamiento.

(ii) Establecer el factor de utilización: Mientras que el perfil operativo dice el porcentaje de tiempo que el equipo estará operando o no funciona, los factores de utilización indican de

qué manera el equipo va a estar funcionando dentro de cada perfil operativo. Por lo tanto, incluso en el modo 'operativo', una máquina podría no estar funcionando continuamente.

(iii) Identificar todos los elementos de costo: los elementos de costo se clasifican en:

- Costos de adquisición inicial
- Costos operacionales: Servicios: Electricidad, agua, aire, etc.  
Mano de obra
- Costos de mantenimiento: Labores de mantenimiento correctivo  
Labores de mantenimiento preventivo  
Partes
- Costos de revisión: Labor  
Partes
- Costos de repuestos iniciales

(iv) Determinar los parámetros críticos del costo: Son los factores que controlan el grado de los gastos realizados durante la vida útil del equipo. Los más significativos son:

- Período de tiempo medio entre fallos
- Período de tiempo entre revisiones
- Período de tiempo de las reparaciones
- Período de tiempo de mantenimiento programado
- Tasa de utilización de la energía

(v). Calcular los costos a precios corrientes

(vi) Calcular costos teniendo en cuenta tasas de interés asumidos: Estos cálculos se hacen en función de la inflación.

(vii) Descontar todos los costos del periodo base: Se debe reconocer que el dinero tiene un valor en el tiempo y los flujos de efectivo que ocurren en diferentes períodos de tiempo deben ser descontados al período base para asegurar la comparabilidad.

(viii) Sumar los costos descontados para establecer el valor actual neto.

### 2.3.2 Metodología para el análisis de los stakeholders

Los pasos que se describen a continuación fueron los utilizados para analizar la dimensión social a partir de los stakeholders.

- Se identificaron los grupos de interés del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.
- Se determinó el nivel de poder de los stakeholders para la cogeneración y para la producción de papel, teniendo en cuenta la clasificación diseñada.
- Se determinó el nivel de interés de los los stakeholders para la cogeneración y para la producción de papel.
- Se elaboró la matriz Poder/Interés y el mapeo de los stakeholders para para la cogeneración y para la producción de papel.

Para la elaboración de la matriz Poder/Interés, fue necesario definir los criterios para valorar el Poder y el Interés de los stakeholders sobre el proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como se observa en la tabla 6.

**Tabla 7:**  
**Clasificación Poder/Interés**

| Nivel | Criterio Poder  | Criterio Interés   | Valor           |
|-------|---|--|-----------------|
| Bajo  | El grupo tiene una baja capacidad de influencia económica, política y social para promover el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar  | La disposición del grupo influye negativamente ante el proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar               | Entre 0 y 0.3   |
| Medio | El grupo tiene una capacidad media de influencia económica, política y social para promover el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar | El grupo de interés presenta una motivación moderada para aportar al proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar | Entre 0.3 y 0.7 |
| Alto  | El grupo tiene una alta capacidad de  | El grupo presenta un alto grado  | Entre 0.7 y     |

| Nivel | Criterio Poder   | Criterio Interés  | Valor |
|-------|--|---|-------|
|       | influencia económica, política y social muy importante y estratégica para promover el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar | de interés y disposición hacia el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. | 1     |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Al cruzar los criterios de poder con los de interés, se pudo analizar el poder/interés de los stakeholders en el proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. En la tabla 7 se muestran los valores de relación de las dos magnitudes y se describe el cuadrante al que pertenecen.

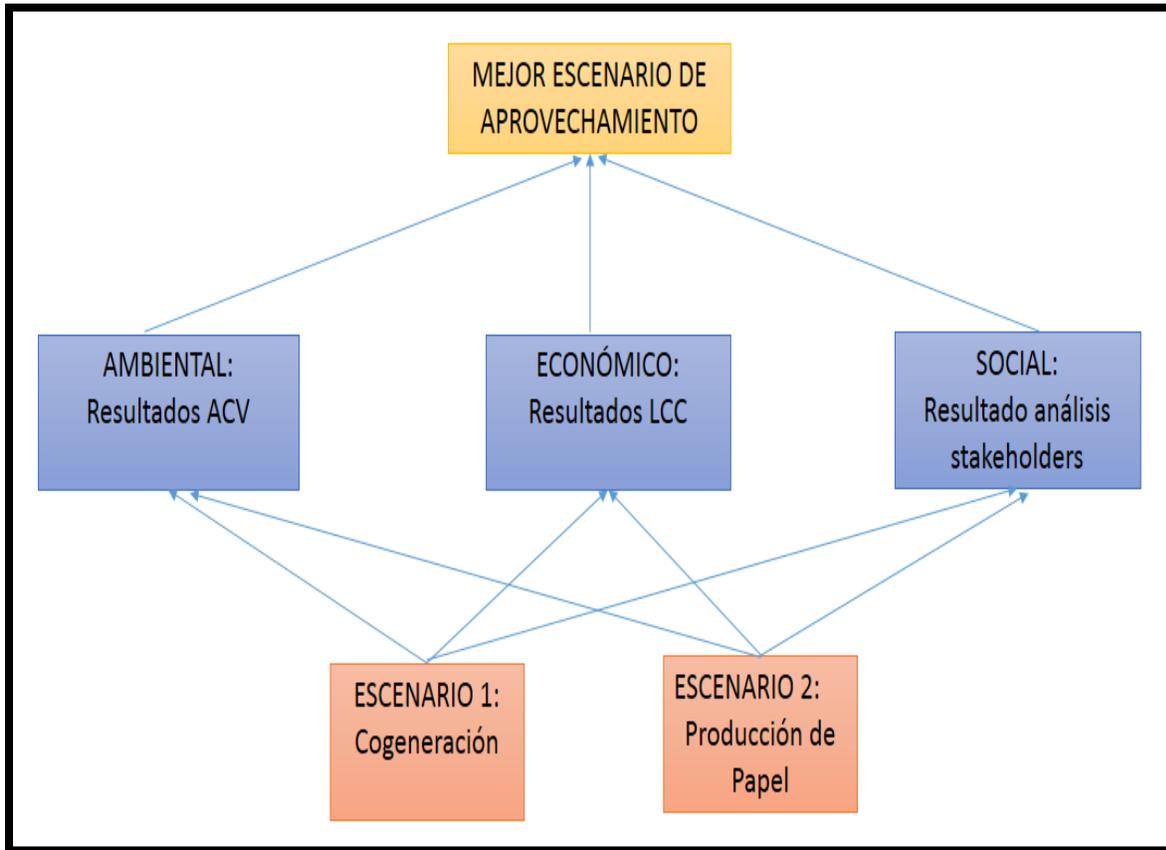
**Tabla 8:**  
**Criterios de análisis de los grupos de interés**

| Puntuación Poder | Puntuación Interés | Interpretación            | Cuadrante |
|------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
| Entre 0 y 0.5    | Entre 0 y 0.5      | Bajo Poder / Bajo Interés | C         |
| Entre 0 y 0.5    | Entre 0.5 y 1      | Bajo Poder / Alto Interés | D         |
| Entre 0.5 y 1    | Entre 0 y 0.5      | Alto Poder / Bajo Interés | B         |
| Entre 0.5 y 1    | Entre 0.5 y 1      | Alto Poder / Alto Interés | A         |

### 2.3.3 Desarrollo del Indicador de Sustentabilidad

Por medio de la metodología Proceso Analítico Jerárquico AHP se integraron los resultados del ACV para la dimensión ambiental, del LCC para la dimensión económica y el Análisis de Stakeholders para la dimensión social, con el fin de evaluar la sustentabilidad.

Teniendo en cuenta que el objeto de la metodología AHP es poder integrar las tres dimensiones de la sustentabilidad, se presenta la estructura jerárquica a utilizar en la Figura 4. Para la dimensión ambiental, se le dio un peso a los resultados de las categorías de impacto del ACV, las cuales fueron las variables que determinaron dicha dimensión. En la dimensión económica se tuvo como variable la Tasa Interna de Retorno; Y en la dimensión social se le dio un peso a las variables de análisis de los stakeholders poder e interés.



**Figura 4. Estructura jerárquica para la toma de decisiones**

Fuente: Elaboración propia, 2015

### 2.3.4 Recomendaciones de sustentabilidad

A partir de los resultados del AHP, se generaron recomendaciones que aportan a la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.

### **3. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA**

La alta competitividad que tiene Colombia en el sector azucarero hace que en la actualidad en el Valle del Cauca existan 13 grandes ingenios que procesan aproximadamente 22 millones de toneladas de caña de azúcar al año. Dentro de las razones por las que Colombia es líder en este sector es por contar con las mejores características biofísicas del mundo como el clima, la precipitación, el suelo, la altura y una amplia experiencia en la obtención de los subproductos como el azúcar y el etanol.

El residuo más importante derivado del procesamiento de la caña de azúcar es el bagazo y en la actualidad los ingenios generan 6 millones de toneladas al año del mismo. El 85% de este bagazo es usado principalmente para la cogeneración de energía en los mismos ingenios y el 15% restante se utiliza para la industria papelera (Asocaña, 2015). La capacidad de cogeneración de los ingenios azucareros ha aumentado progresivamente en los últimos años hasta el punto en que en la actualidad los ingenios son capaces de autoabastecerse energéticamente y entregar a la red nacional parte de la energía producida. De acuerdo con el informe de Fedesarrollo para la matriz eléctrica Colombiana, la producción de electricidad a partir de bagazo en el año 2012 fue alrededor del 1% (Fedesarrollo, 2013).

El escenario actual de aprovechamiento del bagazo en cantidades anuales es de 5'100.000 toneladas que son utilizadas para cogeneración y las 900.000 toneladas restantes son utilizadas por Carvajal Pulpa y Papel para la producción de papel (Carvajal S.A., 2012). En la Figura 5 se muestra el diagrama esquemático del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

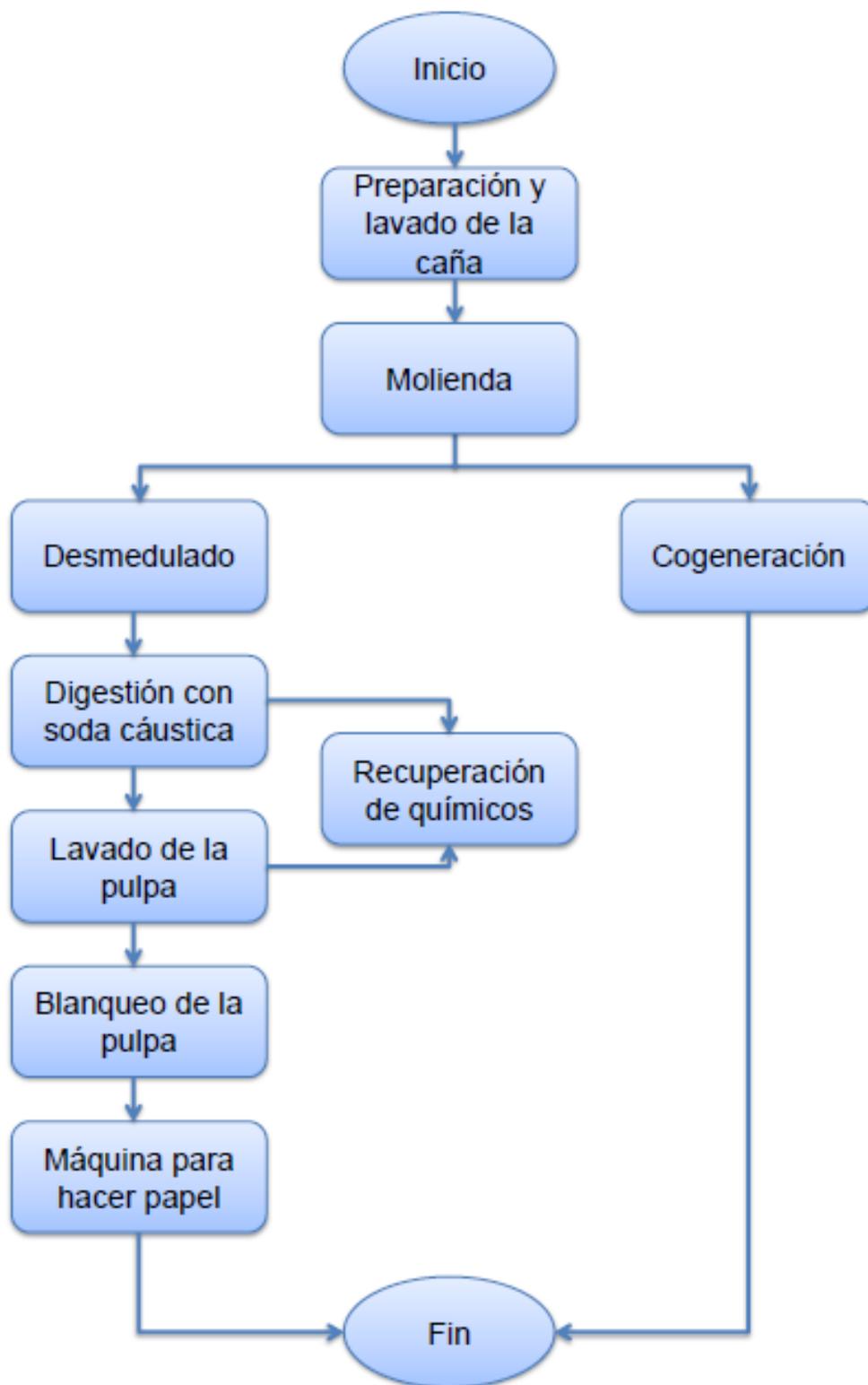


Figura 5. Diagrama esquemático del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca

Fuente: Elaboración propia, 2015

El sector azucarero en Colombia ha consolidado políticas de desarrollo sustentable que han surgido desde acuerdos de importantes actores como agremiaciones como Asocaña, Cenicaña, Las Corporaciones Autónomas Regionales del Valle y del Cauca y la comunidad. El subsector concentra tres aspectos fundamentales (Asocaña, 2010):

- Apoyo de acciones para la consolidación del individuo y su desarrollo como parte integral de la comunidad y como eje de la sociedad
- Preservación y conservación del ambiente
- Generación de alianzas en el marco de la política pública, como un potencial para el fortalecimiento del tejido social y desarrollo territorial.

En el marco anterior, se elaboró un análisis del estado actual de las tres dimensiones de la sustentabilidad para los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, para lo cual se hace una breve descripción de los procesos unitarios asociados a cada alternativa, como punto de partida para analizar los aspectos que se desprenden de dichos procesos, y que causarán impactos en las dimensiones ambiental, económica y social de la sustentabilidad. Dicho diagnóstico se elaboró con base en las visitas realizadas a Carvajal Pulpa y Papel, Asocaña, Cenicaña, la consulta a los expertos en el tema, informes de las entidades públicas y privadas y a tesis de grado y pasantías realizadas en la zona.

### **3.1 Descripción de los Procesos del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

En la Tabla 8 se describen brevemente los procesos involucrados en el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar con base en las etapas que se muestran en la figura 5. En el siguiente capítulo (Capítulo 4: Análisis de Ciclo de Vida) se precisan las cantidades, flujos másicos y de energía de cada uno de estos procesos, necesarios para el análisis de inventario y su posterior evaluación ambiental.

**Tabla 9:**  
**Descripción de los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

| Proceso                         | Descripción  |
|---------------------------------|--|
| Preparación y lavado de la caña | La caña llega a la planta de procesamiento, en tractomulas. En la báscula se pesa y se muestrea para determinar la calidad, contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. La limpieza de caña se efectúa a través de sistemas de lavado, con el fin de retirar la mayor cantidad de materia extraña. Seguidamente, pasa a picadoras o trituradoras independientes en donde se astilla y se nivela el colchón de caña que entrará al molino.   |
| Molienda                        | Proceso donde se obtiene la materia prima para la cogeneración de energía y se separa la porción que se utiliza para la fabricación de azúcares y alcoholes si se da el caso.  |
| Cogeneración con bagazo         | Proceso en el cual se produce de forma simultánea energía eléctrica, mecánica y térmica. El sector azucarero ha sido señalado por estudios nacionales e internacionales como aquel de mayor potencial de cogeneración en Colombia por su disponibilidad de biomasa, en especial el bagazo. Contiene los siguientes subprocesos: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratamiento de agua de calderas</li> <li>- Almacenamiento de agua</li> <li>- Generación de Vapor</li> <li>- Generación de energía</li> <li>- Transformación de energía eléctrica</li> </ul>   |
| Producción de papel             | El bagazo que se utiliza para la producción de papel es conducido a la planta de Carvajal Pulpa y Papel en donde es transformado y se llevan a cabo los subprocesos que a continuación se describen.   |
| Desmedulado                     | El bagazo es agitado, golpeado y centrifugado por medio de líneas de desmeduladores, para realizar la separación fibra/médula, los equipos poseen paquetes de martillos que golpean el bagazo integral contra cribas que permiten el pasaje (rechazo) de la médula y la retención (aceptado) de la fracción rica en fibra, para después ser lavado y enviado a la sección de cocción.  |
| Digestión con soda cáustica     | La fibra de bagazo es sometida a un proceso de cocción con soda cáustica, vapor de alta presión y temperatura. En este proceso, la lignina del bagazo se extrae hasta descomponerla quedando solo la fibra y una lignina residual que luego se degrada con el proceso de blanqueamiento. Esta operación se efectúa en digestores continuos.<br>Durante este proceso de cocción la fibra es conducida por un grupo de tres tubos digestores, involucrando temperatura y presión de vapor constante. En el tiempo de cocimiento se continúa agregando soda y algunos químicos como carbonatos.<br>El producto final de la extracción de la lignina se denomina licor negro del cual, una parte es enviada a la sección de evaporadores para pulverizarlo, y otra es enviada nuevamente por recirculación al proceso como licor de cocción. |
| Lavado de la pulpa              | Tiene como objetivo quitar todas las impurezas y separar de la pulpa cocida el licor negro que la acompaña; por medio de filtros lavadores en contracorriente donde es separada del licor negro; Este licor se procesa en el anillo de recuperación, donde es reconvertido en soda cáustica para su nueva utilización.<br>La pulpa lavada es sometida a un proceso de selección y limpieza para luego ser almacenada en una torre o tanque.  |
| Recuperación de químicos        | El licor negro se ingresa a evaporadores en donde se evapora hasta disminuir su humedad al 40 %, luego se pulveriza en la caldera de recuperación.<br>La parte orgánica se consume como combustible, generando calor que se  |

| Proceso                            | Descripción  |
|------------------------------------|--|
|                                    | recupera en la parte superior del horno en forma de vapor a elevada temperatura.<br>La parte inorgánica no quemada se recoge en el fondo de la caldera como una mezcla fundida. El fundido fluye fuera del horno y se disuelve en agua, obteniéndose un licor que contiene principalmente NaOH.  |
| Blanqueo de la pulpa               | Es implementado para retirar la lignina residual que le confiere el color marrón a la pulpa. Esto se logra paulatinamente a lo largo del proceso de blanqueo por reacciones químicas que ocurren en cada una de las etapas (torres de retención y posterior lavado por filtración) para eliminar los productos de cada reacción. Se produce soda cáustica de alta pureza, cloro, ácido clorhídrico e hipoclorito de sodio.   |
| Máquina para hacer papel           | La pulpa que entra a la máquina tiene 99.1% de agua y el papel final tiene 4% de agua por lo que se debe de realizar un proceso de secado en esta máquina. Para iniciar el proceso de secado la pulpa entra a una malla de formación en donde parte del agua sale por gravedad, seguidamente la pulpa entra a unos rodillos que le hace presión para posteriormente entrar a unos rodillos secadores que van a terminar de retirar el agua de la pulpa para que se forme el papel. |
| Cogeneración con medula del bagazo | En las plantas de carvajal Pulpa y Papel, aprovechan la fracción rica en médula generada en el proceso de desmedulado para cogenerar energía para los procesos.  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

De cada uno de los procesos descritos en la tabla 8, se generan aspectos ambientales, económicos y sociales que afectan positiva y negativamente la sustentabilidad de cada proceso de aprovechamiento. A continuación se estudian los aspectos asociados a cada dimensión y se analizan algunas variables.

### 3.2 Análisis de la Dimensión Ambiental de la Sustentabilidad

Para el análisis de la dimensión ambiental se identificaron los aspectos ambientales que generan impactos ambientales en cada proceso de aprovechamiento dentro de los que se encuentran los vertimientos, las emisiones, el consumo de agua, el ahorro de recursos naturales y los residuos generados. En la figuras 6 se muestra la identificación de aspectos ambientales a partir de diagramas de entradas y salidas para cada proceso. Las salidas se consideran los aspectos ambientales que generan los respectivos impactos ambientales.



**Aspectos ambientales en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

**Entradas**

**Subproceso**

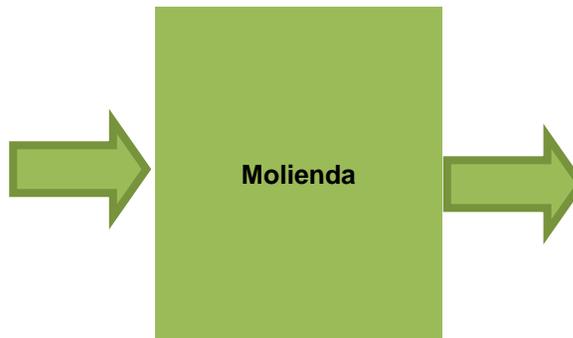
**Salidas**

Caña de azúcar  
Vehículos de transporte  
Maquinaria  
Energía eléctrica  
Agua



Generación de emisiones de polvo por descargue  
Generación de residuos sólidos: caña, tierra y lodo  
Generación de gases de combustión por transporte y funcionamiento de equipos  
Generación de vertimientos: Lavado del patio, lavado de la caña  
Consumo de energía  
Consumo de agua

Energía térmica o eléctrica  
Grasa, lubricantes  
Agua  
Bactericidas

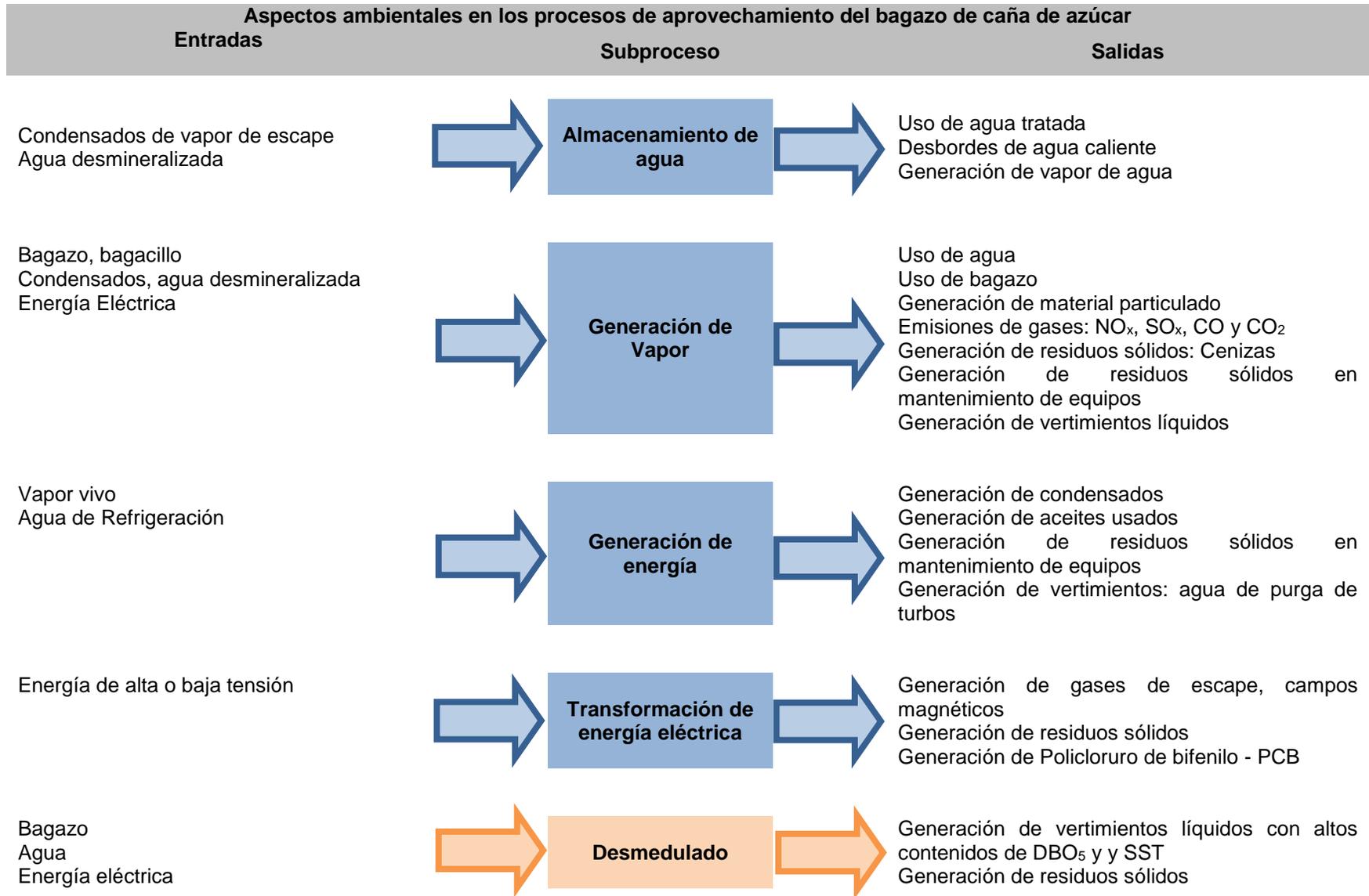


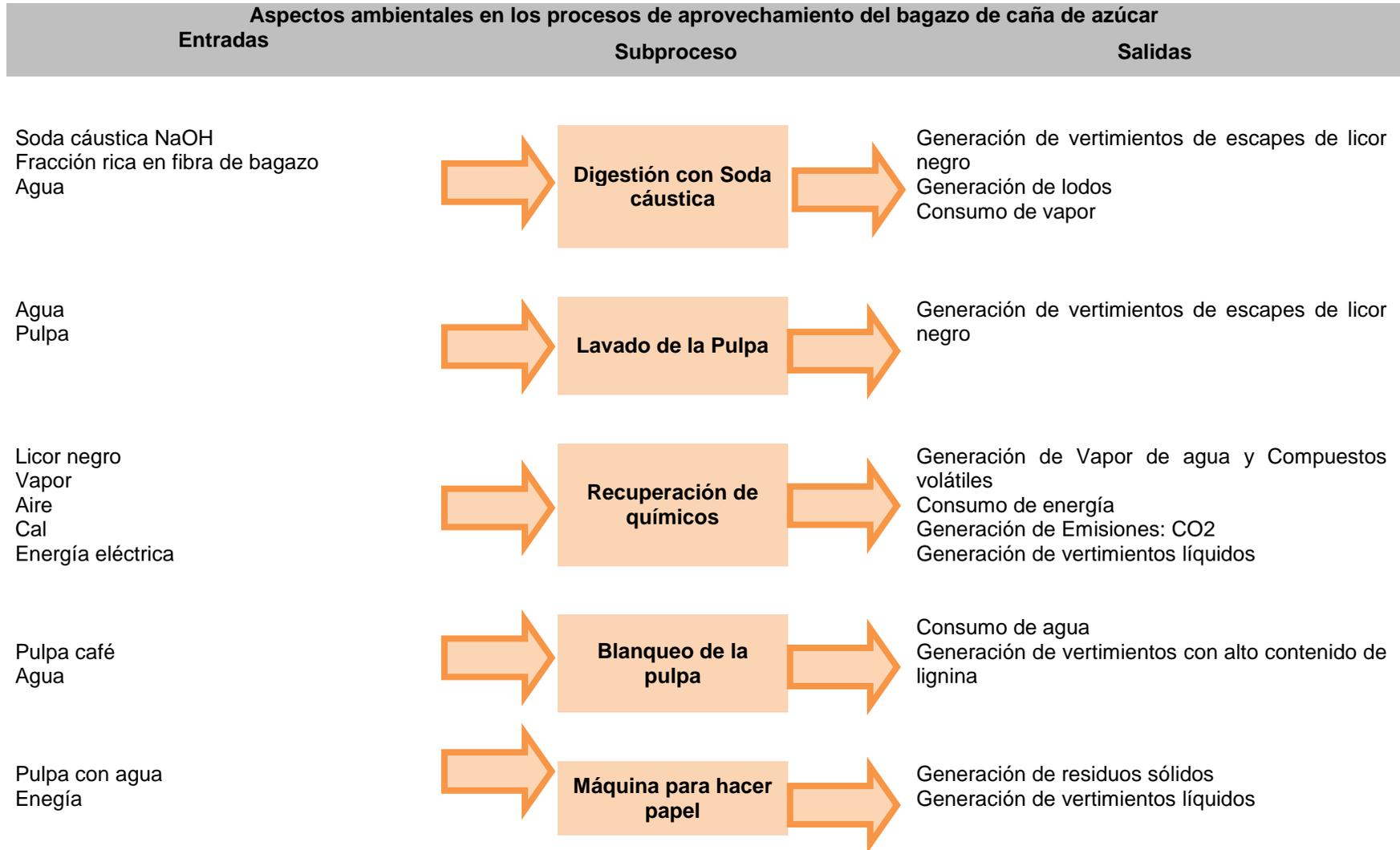
Uso de vapor  
Generación de emisiones atmosféricas: Vapor de agua, bagacillo, calor, ruido  
Generación de vertimientos: Aguas dulces  
Uso de aguas dulces para maceración  
Uso de agua industrial  
Generación de vertimientos líquidos: aguas grasas  
Generación de vertimientos: aguas de enfriamiento  
Generación de bagazo

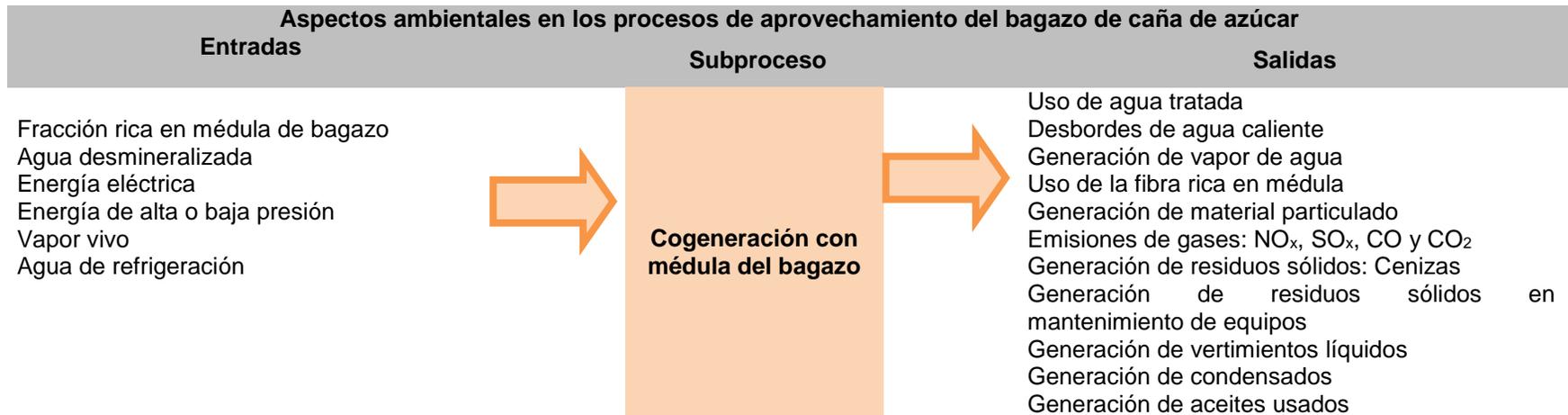
Insumos químicos  
Agua condensada e industrial  
Aire de ventilación  
Agua de enfriamiento



Uso de agua industrial  
Uso de vapor de escape  
Generación de residuos sólidos: empaques y recipientes de insumos  
Generación de vertimientos líquidos por uso de insumos  
Derrame de productos  
Agua de Purga





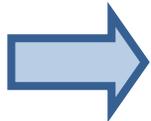


**Figura 6. Identificación de Aspectos ambientales en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

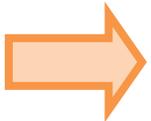
Fuente: Construcción a partir de las guías ambientales para el sector azucarero 2002 y 2010, Información de funcionarios de la empresa Carvajal Pulpa y Papel y visita técnica a ingenio y a la planta de producción de papel de Yumbo



El color verde hace referencia a los procesos de transformación de la caña a bagazo



El Color azul hace referencia a los subprocesos de cogeneración de energía con el bagazo



El Color naranja hace referencia a los subprocesos de producción de papel con el bagazo

Del anterior análisis de los aspectos ambientales por subproceso, se hará referencia a continuación a los que se identificaron como los más relevantes.

### 3.2.1 Vertimientos

- **En los Ingenios:**

En el proceso de cogeneración de energía en los ingenios, las fuentes de los vertimientos son el agua de lavado de la caña, agua de lavado de equipos y tuberías, agua contenida en las cenizas de las calderas cuando se recogen en húmedo, por derrames en el almacenamiento de agua de enfriamiento, en la generación de vapor y uso de agua para purga en tubos (García Romo, 2010).

El agua utilizada en el lavado de la caña constituye la mayor fuente de contaminación por las concentraciones elevadas de sólidos suspendidos. Cuando la caña se recolecta por medios mecánicos esta agua puede contener niveles elevados de azúcares por lo que la DBO del vertimiento se ve afectada. Pese a lo anterior, los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST en el efluente final de los ingenios, no sobrepasan los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público que se dan en la resolución 631 de 2015 (Asocaña, 2009) (Asocaña, 2013) (Asocaña, 2014).

**Tabla 10:**  
**Datos de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST en el efluente de los ingenios**

| Años | Carga de DBO <sub>5</sub> en Efluente mg/L          | Carga de DQO en Efluente mg/l                       | Carga de SST en Efluente mg/l                       |
|------|---|---|---|
|      | Máx permisible Res. 631 de 2015:<br><b>500 mg/L</b> | Máx permisible Res. 631 de 2015:<br><b>900 mg/L</b> | Máx permisible Res. 631 de 2015:<br><b>200 mg/L</b> |
| 2009 | 199,5   | 380,9   | 54,4  |
| 2010 | 255,2   | 490,8   | 98,2  |
| 2011 | 324,5   | 649,0   | 121,7   |
| 2012 | 346,4   | 757,8   | 151,6   |
| 2013 | 243,6   | 507,5   | 182,7   |

Fuente: Informes de sostenibilidad de los años 2009 a 2013

- **En la producción de papel:**

Los vertimientos en la producción de papel son generados en las etapas de lavado y adecuación de la pulpa, y durante el proceso de blanqueo de papel, donde se limpia de impurezas a la pulpa y se le retira la lignina residual. La DBO del agua efluente del lavado es de aproximadamente 1000 mg/L y el máximo permisible en Colombia por normatividad (Resolución 631 de 2015) es de 500 mg/L.

Para el caso de la DQO, el efluente es de aproximadamente 3500 mg/L y el máximo permisible en Colombia es de 900 mg/L, esto se debe a que del proceso de pulpeo se genera el licor negro que posee sólidos suspendidos, material orgánico disuelto, electrolitos e iones inorgánicos que contribuyen a la DQO (Ortiz Rivera, 2009).

La PTAR de Carvajal Pulpa y Papel tiene tratamiento primario por medio de un clarificador primario, secundario por medio de una laguna aireada facultativa y una laguna de sedimentación (Rodríguez, Mañunga, & Cárdenas, 2012). El agua residual tratada es vertida al río Palo. Para el afluente de la etapa de desmedulado se realiza tratamiento anaeróbico, ya que los niveles de SST Y DBO<sub>5</sub> de este proceso son altos (Soto Duque, 2015). En el proceso también utilizan bacterias protectoras (BPA) para minimizar olores. Para minimizar estos olores también implementaron una barrera viva con 10000 plantas.

A los vertimientos que se generan de la recuperación de químicos se les realiza una neutralización antes de ser llevados a la planta de tratamiento. En la tabla 10 se presenta la caracterización del agua residual afluente a la PTAR y los efluentes de las unidades que componen el sistema de tratamiento: Del clarificador primario, de la laguna aireada facultativa y del efluente final. Dichos datos fueron comparados con la norma vigente para este tipo de vertimientos, la resolución 631 de 2015 y se concluyó que con el proceso de tratamiento cumplen con la normatividad excepto con el parámetro de SST.

**Tabla 11:**  
**Caracterización del afluente y efluentes de la PTAR de Carvajal Pulpa y Papel**

| Parámetros               | Afluente    | Efluente clarificador Primario | Efluente Laguna aireada facultativa | Efluente final | Res. 631 de 2015                 |
|--------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| Temperatura °C           | 38.8 – 43.3 | 39.5 – 43.4                    | 27.2 – 32.9                         | 24.7 – 31.1    | Menor de 5°C del cuerpo receptor |
| Intervalo de pH Unidades | 5.4 – 8.9   | 4.9 -5.9                       | 7.6 – 7.8                           | 6.3 -7.7       | 6 – 9                            |
| SST mg/L                 | 2449        | 489                            | 465                                 | 214            | 200                              |
| DQO mg/L                 | 3718        | 1700                           | 674                                 | 439            | 900                              |
| DBO mg/L                 | 1108        | 829                            | 137                                 | 83             | 500                              |

Fuente: (Rodríguez, Mañunga, & Cárdenas, 2012)

### 3.2.2 Consumo de agua

El consumo de agua para el sector azucarero ha hecho que las cuencas hídricas no presenten la misma disponibilidad de agua, lo que limitaría el desarrollo de esta actividad. Según la Corporación Autónoma Regional del Cauca, 6 de las 12 subcuencas hídricas que usa el sector azucarero puede llegar a presentar valores menores a 1000 m<sup>3</sup>/hab/año, lo que limitaría el desarrollo de la actividad teniendo en cuenta que en promedio deben ser 2000 m<sup>3</sup>/hab/año; para el caso del agua subterránea, según la Corporación Autónoma regional del Valle, el 86,4% del agua extraída es utilizada para actividades agrícolas (Asocaña, 2010).

Con estos antecedentes, el sector ha dirigido sus esfuerzos al uso racional del agua en actividades agrícolas e industriales y a la conservación y manejo de cuencas hidrográficas con el programa agua por la vida y la sostenibilidad. El programa aporta en el seguimiento a los usuarios que usan y realizan vertidos en los ríos del área de influencia. Este programa se realiza con el apoyo de las 15 asociaciones de usuarios de los ríos.

### - En los Ingenios

En el proceso de cogeneración de energía, el agua se consume para los usos que se muestran en la tabla 11.

**Tabla 12:**  
**Uso del agua en el proceso de cogeneración en los ingenios azucareros**

| Categoría   | Ubicación   |
|---|---|
| Uso del agua vinculada directamente con el proceso productivo | Agua de alimentación a calderas<br>Vapor consumido en los motores primarios<br>Escapes a la atmósfera por válvulas, tuberías y equipos de proceso<br>Limpieza y desinfección de sistemas mediante equipos auxiliares: sopladores de hollín, escobas de tachos, etc.<br>Limpieza y desinfección de sistemas mediante mangueras: desinfección de tándems.<br>Imbibición |
| Uso de agua vinculada indirectamente al proceso productivo    | Sistema contra incendios<br>Sistemas de protección e higiene vinculados al proceso.<br>Sistemas de regeneración de la planta de tratamiento de aguas<br>Planta eléctrica<br>Talleres mecánicos destinados a las reparaciones y fabricación de piezas.   |
| Uso de agua no vinculada al proceso productivo                | Sistemas sanitarios y de higiene de recursos humanos auxiliar al proceso.   |

Las reconversiones tecnológicas y los programas de uso eficiente del agua que se han llevado a cabo para controlar el consumo de agua en fábrica ha aportado para que el consumo se haya reducido de 120 m<sup>3</sup>/TCM<sup>1</sup> a 90 m<sup>3</sup>/TCM, con lo cual se han logrado ahorros en el consumo de agua superiores a los 600 millones de metros cúbicos al año (Ronderos & Palacios , 2010).

### - En Carvajal Pulpa y papel

El mayor consumo de agua en Carvajal Pulpa y Papel se da en el proceso de blanqueo de la pulpa y en segunda instancia en la máquina para hacer papel. Para el año 2003 el

---

<sup>1</sup> Toneladas de Caña Molida

consumo de agua era de 110 m<sup>3</sup>/Ton de Papel producido, para el 2008 el consumo disminuyó a 90 m<sup>3</sup>/Ton y para el 2011 fue de 80 m<sup>3</sup>/Ton. Lo que indica que las prácticas implementadas en el programa de uso eficiente y ahorro de agua han tenido resultados relevantes en la disminución del consumo del agua (Carvajal Pulpa y Papel, 2011).

### 3.2.3 Consumo de energía

Sobre el consumo de energía es preciso analizar que a partir de los sistemas de cogeneración se está utilizando un combustible alternativo a los combustibles fósiles lo que disminuye los niveles de contaminación y contribuye a al ahorro energético. Según el concepto de la CVC: *“En una termoeléctrica convencional, de un 100% de energía contenida en un combustible sólo el 33% se convierte en energía eléctrica; el resto se pierde, mientras que, en los sistemas de cogeneración se aprovecha el 84% de la energía contenida en el combustible para la generación de energía eléctrica y calor para otros procesos (25-30% eléctrico y 59%-54% térmico). En consecuencia, la cogeneración se incluye en los programas de uso eficiente de energía primaria conformado por el petróleo, el gas natural y el carbón mineral, reduciendo, por lo tanto, el consumo de combustibles no renovables”*

Teniendo en cuenta lo anterior, las dos alternativas de aprovechamiento analizadas tiene procesos de cogeneración de energía lo que hace que los dos procesos tengan menor consumo de combustible, menores emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>2</sub> y que se generen menos pérdidas a la red eléctrica por la cercanía de las instalaciones al punto de consumo.

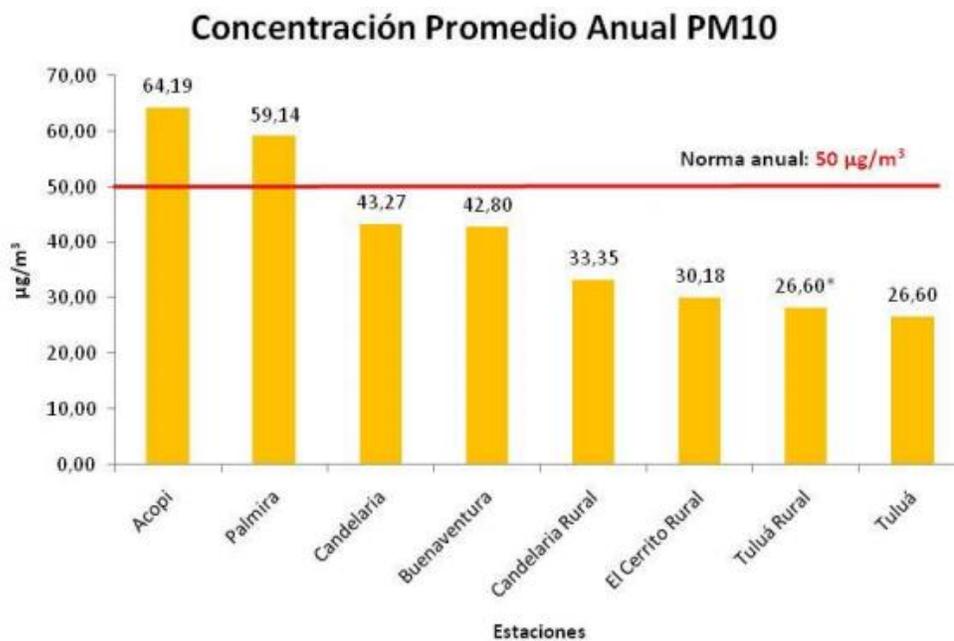
En Carvajal Pulpa y Papel para el año 2014, el consumo total de energía directa adquirida para la producción de papel fue de 443.403.312 GJ/año y la energía total producida por la organización fue de 1.012.982 GJ/año, por lo que el consumo total de energía fue de 444.413.295 GJ/año (Carvajal Pulpa y Papel, 2014)

### 3.2.4 Emisiones Atmosféricas

#### - En los Ingenios:

El alto contenido de humedad del bagazo como combustible produce una pesada contaminación del aire. El mayor contaminante de los ingenios es el material particulado y sus concentraciones pueden variar por el uso de caña mal lavada o preparada inadecuadamente ya que se aumenta el contenido de cenizas del bagazo, por el tipo de caldera utilizada, y por la eficiencia del turbogenerador.

Para minimizar los niveles de este contaminante, los ingenios azucareros de la región se han acogido a la suscripción de convenios de producción más limpia con base al artículo 99 del Decreto 948 de 1995 y a la resolución 909 de 2008, presentando el plan de reconversión a tecnología limpia, lo que les ha servido para ser excluidos del impuesto sobre las ventas IVA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2015). Según el Informe del Estado de la calidad del aire en Colombia que evalúa las estaciones de monitoreo de Yumbo y Palmira en el Valle del Cauca, se registró un aumento en las concentraciones de Material Particulado de  $28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $45.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del 2007 al 2010 respectivamente (IDEAM, 2012), aunque no sobrepasan lo estipulado en la resolución 909 de 2008 que es de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedios anuales. Sin embargo, en el informe de calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, la concentración promedio anual se supera en dos estaciones como se observa en la figura 7 (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2012).



**Figura 7. Concentración de PM 10 en el Valle del Cauca 2011**  
 Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2012)

En contradicción al material particulado, las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> son más bajas que cuando se queman los combustibles fósiles como el carbón, ACPM, debido a los bajos niveles de azufre y nitrógeno presentes en el bagazo. El uso de combustibles auxiliares durante el arranque de las calderas o cuando el contenido de humedad del bagazo es muy alto para mantener la combustión, da como resultado el incremento de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. También los Trastornos en las condiciones en que se realiza la combustión producen el aumento de las emisiones de CO, de compuestos orgánicos volátiles y de compuestos orgánicos totales.

En cuanto al CO<sub>2</sub>, la cogeneración a partir del bagazo de caña es un caso particular en cuanto a la contabilización de externalidades, pues a pesar de que la combustión de biomasa genera CO<sub>2</sub>, éste es considerado como parte del ciclo natural del carbono en la tierra. Las plantas toman CO<sub>2</sub> del aire para crecer y luego lo devuelven al aire cuando son quemadas, de manera que no generan un aumento neto de CO<sub>2</sub> (asumiendo que no hay cambio de uso de suelo para la producción de biomasa) (Fedesarrollo, 2013).

### - En la producción de papel

En la producción de papel los principales emisores de contaminantes al aire son las tres fuentes fijas. En la tabla 9 se presentan los resultados de un monitoreo realizado en diciembre de 2011 a cada fuente.

**Tabla 13:**  
**Monitoreo de emisiones en la planta de Carvajal Pulpa y Papel**

| Fuente               | Parámetro       | Unidad            | Meta                      |                        | Resultados<br>Diciembre 2011 |
|----------------------|-----------------|-------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
|                      |                 |                   | Resolución 909<br>de 2008 | PRTL 2011 <sup>2</sup> |                              |
| Caldera potencia     | MP              | mg/m <sup>3</sup> | 100                       | 200                    | 189                          |
|                      | NO <sub>x</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 760                       | 750                    | 598                          |
|                      | SO <sub>2</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 2800                      | 2000                   | 2792                         |
| Caldera recuperación | MP              | mg/m <sup>3</sup> | 150                       | 200                    | 110                          |
|                      | NO <sub>x</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 550                       | 550                    | 148                          |
|                      | SO <sub>2</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 550                       | 550                    | 0.0                          |
| Horno Cal            | MP              | mg/m <sup>3</sup> | 150                       | 300                    | 198                          |
|                      | NO <sub>x</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 550                       | 550                    | 5.2                          |
|                      | SO <sub>2</sub> | mg/m <sup>3</sup> | 550                       | 550                    | 5.2                          |

Fuente: (Carvajal Pulpa y Papel, 2011)

Como se observa en la tabla 12, las emisiones de material particulado superan la normatividad en la caldera de potencia y en el horno de cal. Los combustibles de la caldera de potencia son carbón y polvillo, los de la caldera de recuperación son licor negro y crudo y el del horno de cal es el crudo. Estos niveles se logran gracias al precipitador electrostático que tiene la caldera de potencia.

### 3.2.5 Generación de Residuos

#### - En los ingenios

El principal residuo sólido que se genera en los ingenios es la ceniza y su producción se encuentra en función de la eficiencia de las calderas y de la calidad de la caña molida.

<sup>2</sup> PRTL es un proyecto de reconversión tecnológica emprendido por la Corporación Autónoma Regional del Cauca y Carvajal Pulpa y Papel

Los otros residuos que se generan los que resultan del mantenimiento de equipos y los empaques de insumos.

**- En la producción de Papel**

Para el 2004 Carvajal Pulpa y papel genera 204.211 toneladas de residuos de los cuales 359 toneladas son residuos peligrosos y 203.852 son residuos no peligrosos (Carvajal Pulpa y Papel, 2014)

Los residuos sólidos industriales se generan se utilizan para la recuperación de suelos de explotación de arcilla.

En conclusión, la tabla 13, contiene las variables de la dimensión ambiental más relevantes en el proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.

**Tabla 14:**  
**Variables involucradas en la dimensión ambiental de la sustentabilidad**

| <b>Variable</b>              | <b>Descripción</b>  |
|------------------------------|---|
| Vertimientos DBO             | Cantidad de materia orgánica biodegradable contenida en el agua residual dispuesta a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo.                       |
| Vertimientos DQO             | Cantidad de materia inorgánica contenida en el agua residual reportada dispuesta a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo.                         |
| Vertimientos SST             | Cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento dispuestos en un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo. |
| Consumo de energía           | Cantidad de energía en GJ utilizada para la producción promedio de toneladas de producto final.   |
| Emisiones PST                | Descarga de Partículas Sólidas Totales al aire, provenientes de las fuentes fijas de cada uno de los procesos   |
| Emisiones NOx                | Descarga de Óxidos de Nitrógeno al aire, provenientes de las fuentes fijas de cada uno de los procesos.   |
| Consumo de agua              | Agua que es utilizada en cada uno de los procesos.  |
| Ahorro de recursos naturales | Cantidad de recursos naturales como pulpa maderable o carbón que se han dejado de adquirir por parte de los dos aprovechadores.                               |
| Residuos generados           | Cantidad de materia que no es aprovechada por los aprovechadores  |

### **3.3 Análisis de la Dimensión Económica de la Sustentabilidad**

La dimensión económica es la que genera más impactos positivos para el desarrollo de la región azucarera. La existencia del cluster azucarero con 1700 cañicultores, 13 ingenios, 5 con planta de etanol carburante, 7 proyecto de refinería, 12 cogeneradores energía, 1 papelera y 1 empresa sucroquímica, hacen que se mejoren las cifras económicas. El sector aporta 260.000 empleos directos e indirectos y su aporte al PIB es del 1% de la economía del país.

El bagazo como subproducto de la industria azucarera hace parte del cluster de la caña de azúcar en Colombia y su importancia es relevante en términos económicos para el sector. A continuación se analiza la dimensión económica en cada proceso de aprovechamiento del bagazo.

#### **- En los Ingenios**

La dimensión económica del aprovechamiento del bagazo en los ingenios se relaciona directamente con la capacidad de producción de energía, aspecto que ha ido mejorando con la expedición de la ley 788 de 2002, en la que se hace exención de la renta por la venta de energía proveniente de biomasa, luego con la ley 1215 de 2008, se exime a los cogeneradores de pagar la contribución del 20% sobre la energía que generen para su consumo y luego se expide la resolución de la comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) número 005 de 2010 regula la actividad y da estímulos en su ejecución. Finalmente se promueve la ley 1715 de 2014 de energías renovables, en donde se promueve el desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía en el sistema energético nacional integrándolas al mercado eléctrico del país (Asocaña, 2015).

Bajo este marco normativo, los ingenios azucareros han podido utilizar los incentivos tributarios para mejorar la eficiencia de sus procesos y por ende la generación de energía de 114 MW en el 2009 a 260 MW en 2015 y se estima que para el 2017 será de 360 MW (Asocaña, 2015);

En la tabla 14 se describen las variables involucradas en la dimensión económica de los ingenios y en la tabla 15 se muestran los valores recopilados de cada una de ellas desde el año 2009 a 2013.

**Tabla 15:**  
**Variables involucradas en la dimensión económica de la sustentabilidad**

| Variable  | Descripción   |
|---|---|
| Productividad del bagazo                                | Porción total aprovechada del bagazo en relación con las toneladas totales producidas de producto.  |
| Generación del producto final                           | Cantidad del producto final generado anualmente, siendo energía y vapor para la cogeneración y papel para Carvajal pulpa y papel                                      |
| Venta de producto final                                 | Se refiere a la cantidad de energía vendida por la cogeneración al SIN y a los millones de pesos vendidos por Carvajal pulpa y papel.                                 |
| Ahorro por cambio de materia prima por el uso de bagazo | Se refiere a los millones de pesos que se están dejando de invertir en los ingenios para compra de carbón y en Carvajal pulpa y papel en la compra de pulpa maderable |

Fuente: Autora

**Tabla 16:**  
Datos dimensión económica para Ingenios.

| Años | DIMENSIÓN ECONOMICA         |  |                                      |   |
|------|-----------------------------|--|--------------------------------------|---|
|      | Productividad del bagazo tn | Generación del producto final (energía MW-GWh) | Venta de producto final (energía MW) | Ahorro por cambio de materia prima millones de \$CO |
| 2009 | 7017622,20                  | 35,00  | 35,00                                | 331,09  |
| 2010 | 6031096,62                  | 59,40  | 54,90                                | 300,47  |
| 2011 | 6761805,44                  | 54,40  | 55,00                                | 377,00  |
| 2012 | 6195029,53                  | 57,00  | 57,00                                | 310,81  |
| 2013 | 6416552,17                  | 66,00  | 66,00                                | 325,52  |

Fuente: Informe Asocaña, Cámara de comercio de Cali, UPME (Asocaña, 2009), (Cámara de comercio de Cali, 2014), (Upme, 2014), (Acevedo Pinzón, 2009), (Asocaña, Cogeneración, 2012).

De la tabla 15 se puede concluir que con una producción de bagazo que incluso para algunos años disminuye, la generación de energía y las ventas han aumentado en los últimos años. El ahorro por cambio de carbón por bagazo en millones de pesos es muy estratégico para el sector y aunque no muestra un crecimiento sostenido, tampoco muestra bajas considerables.

### - En Carvajal Pulpa y Papel

Al analizar las mismas variables de la tabla 14 para Carvajal pulpa y papel, como se muestra en la tabla 16, del 100% del total de bagazo que va de los ingenios a Carvajal Pulpa, aproximadamente el 40% se convierte en Papel generando utilidades anuales de aproximadamente 500.000 millones de pesos.

**Tabla 17:**

Datos dimensión económica para Carvajal Pulpa y Papel.

| AÑOS | DIMENSIÓN ECONÓMICA            |   |   |   |
|------|--------------------------------|---|---|---|
|      | Productividad del bagazo (Ton) | Ventas de producto final (Papel) (Millones \$COP) | Generación del producto final (Papel) (Ton) | Ahorro por cambio de materia prima (Pulpa) (Millones \$COP) |
|      | 1                              | 1   | 1   | 1   |
| 2010 | 646392,1                       | 548272,0  | 233692,0                                    | 1028244800,0  |
| 2011 | 655716,3                       | 534686,5  | 237063,0                                    | 1043077200,0  |
| 2012 | 676220,6                       | 527893,8  | 244476,0                                    | 1075694400,0  |

Fuente: Informes anual y de sostenibilidad de Propal (Carvajal Pulpa y Papel, 2010), (Carvajal S.A., 2011), (Carvajal S.A., 2012), (Carvajal Internacional S.A., 2010), (Carvajal S.A., 2011), (Carvajal S.A., 2012).

## 3.4 Análisis de la Dimensión Social de la Sustentabilidad

Para el análisis de esta dimensión, se revisaron los avances en materia de responsabilidad social empresarial de los ingenios y de Carvajal Pulpa y Papel y su respectiva influencia en la calidad de vida de las personas, dando relevancia a aspectos como la educación, ambientes saludables, equidad de género valores familiares, condiciones laborales y de manera general las necesidades básicas insatisfechas.

Según el análisis social de Fedesarrollo, indica que el Índice de Calidad de Vida ICV de los municipios del área de influencia del subsector azucarero es en promedio más alto

que en el resto de municipios agrícolas. Lo que está relacionado con mejores vivienda, mejores acceso a servicios públicos, más educación, mejor asistencia escolar, menor hacinamiento habitacional. Los resultados son los mismos para el índice de Necesidades Básicas Insatisfechas también es más bajo, por lo que es un indicador de mayor tasa de alfabetismo, asistencia escolar, menores tasas de mortalidad y morbilidad.

En la tabla 17 se muestran las variables escogidas para valorar la dimensión social de la sustentabilidad.

**Tabla 18:**  
**Variables involucradas en la dimensión social de la sustentabilidad**

| <b>Variable</b>                        | <b>Descripción</b>  |
|--|---|
| Inversión en proyectos sociales        | Millones de pesos que se invierten en los diferentes proyectos sociales los ingenios y Carvajal Pulpa y Papel   |
| Mejora del perfil laboral              | Cantidad de personas capacitadas por los programas y convenios educativos de los ingenios, y las horas de capacitación implementadas a los empleados en Carvajal Pulpa y Papel. |
| Generación de empleo                   | Se refiere a la cantidad de empleos generados anualmente por los ingenios y por Carvajal pulpa y papel.   |
| Cantidad de beneficiados por programas | Se refiere a la cantidad de personas que participan en cada uno de los programas sociales de los ingenios y por Carvajal pulpa y papel.   |

Fuente: Autora

#### - En los Ingenios

Los ingenios azucareros, liderados por la Asociación de cultivadores de caña de azúcar en Colombia ASOCAÑA, han buscado con la responsabilidad social empresarial, tratar de llegar a la mayor cantidad de población vulnerable en su área de influencia, con programas encaminados a mejorar los estándares de calidad de vida de la población. Según Fedesarrollo, la inversión total en acciones de Responsabilidad Social Empresarial como porcentaje de las utilidades de los ingenios, es de aproximadamente del 20% (Fedesarrollo, 2010).

En cuanto al perfil laboral de las personas que laboran con el proceso de cogeneración, está relacionado directamente con la nómina del proceso en fábrica, lo que quiere decir que no incluye a las cooperativas de trabajo asociado, sino que son nómina directa y

contratistas. Según Fedesarrollo, el sector en general se ha caracterizado por una relativa estabilidad de personal que labora directamente en la industria y la tendencia en el número de trabajadores contratados por la misma que para el 2007 fue de 30.865 trabajadores directos (Ronderos & Palacios , 2010).

En la tabla 18 se muestran los datos de los ingenios para cada variable analizada.

**Tabla 19:**

Datos dimensión social para Asocaña.

| Años        | <b>DIMENSIÓN SOCIAL</b>                             |  |                                 |   |
|-------------|---|--|---------------------------------|---|
|             | Inversión en proyectos sociales (millones de pesos) | Mejora del perfil laboral (personas capacitadas) | Generación de empleo (personas) | Cantidad de beneficiados por programas (personas) |
| <b>2009</b> | 262,13  | 5066,67  | 188533,00                       | 4302,25   |
| <b>2010</b> | 465,00  | 3812,13  | 188533,00                       | 3451,70   |
| <b>2011</b> | 580,33  | 4318,75  | 188533,00                       | 3857,20   |
| <b>2012</b> | 428,33  | 4905,00  | 188000,00                       | 4757,40   |
| <b>2013</b> | 439,40  | 7376,20  | 180000,00                       | 7228,80   |

Fuente: Informes Asocaña, Fedesarrollo (Asocaña, 2009), (Asocaña, 2013), (Asocaña, 2014), (Fedesarrollo, 2010), (Ronderos, 2011).

#### - En Carvajal Pulpa y Papel

Carvajal Pulpa y papel es reconocida por el Valle del Cauca y en el país como una empresa responsable social y ambientalmente. Su responsabilidad social empresarial se enfoca hacia la consolidación de valores como la integridad, respeto, orientación al cliente, innovación, compromiso social y compromiso con los resultados. Para el informe de sostenibilidad 2014, la empresa cuenta con 1049 colaboradores indefinidos, 21 colaboradores temporales y 299 empleados en misión. Los programas sociales se complementan con recursos de cooperación nacional e internacional lo que posibilita la intervención integral, tener un mayor impacto en cobertura y acompañar a las comunidades vulnerables (**Carvajal Pulpa y Papel, 2014**).

Los proyectos más importantes son el de generación de ingresos, que son incentivas de asociación a partir de intereses comunes de los trabajadores; Educación y Cultura, en donde por medio de jornadas educativas a comunidades de su zona de influencia; Infraestructura comunitaria y vivienda, en donde aportan con el diseño y obras en las que transforman espacios para brindarle a la comunidad servicios educativos, recreativos, deportivos, culturales y comunitarios (Carvajal Pulpa y Papel, 2014).

En la tabla 19 se muestran los datos de Carvajal Pulpa y Papel para cada variable analizada.

**Tabla 20:**  
Datos dimensión social para Carvajal Pulpa y Papel.

| AÑOS        | DIMENSIÓN SOCIAL                              |   |  |  |
|-------------|---|---|--|--|
|             | Inversión proyectos sociales (Millones \$COP) | Mejora del perfil laboral (Horas capacitación por empleado) | Generación de empleos (Personas empleadas) | Cantidad de beneficiados por programas (Personas beneficiadas) |
|             | 1   | 1   | 1  | 1  |
| <b>2010</b> | 1332000000,0                                  | 85,1  | 1599,0                                     | 11850,0  |
| <b>2011</b> | 2158912000,0                                  | 129,0   | 1572,0                                     | 15500,0  |
| <b>2012</b> | 533990000,0                                   | 197,0   | 1507,0                                     | 16658,0  |

Fuente: Informes anual y de sostenibilidad de Propal (Carvajal Pulpa y Papel, 2010), (Carvajal S.A., 2011), (Carvajal S.A., 2012), (Carvajal Internacional S.A., 2010), (Carvajal S.A., 2011), (Carvajal S.A., 2012).



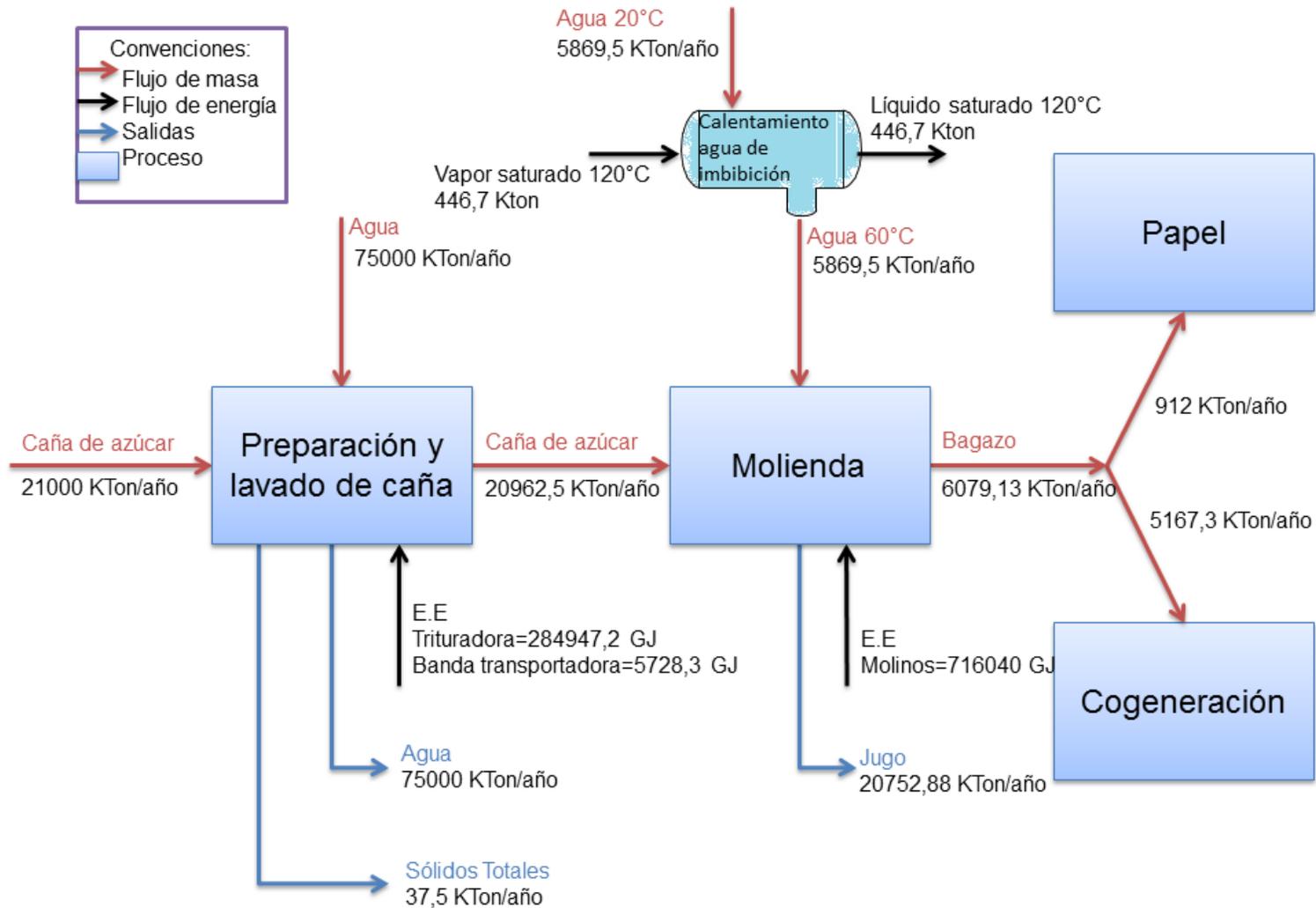
## **4. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA**

A continuación se presentan los resultados del Análisis del Ciclo de Vida del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. El objetivo del presente ACV fue evaluar los impactos ambientales del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

### **4.1 Análisis del inventario del Ciclo de Vida**

Teniendo en cuenta el diagnóstico del estado actual del aprovechamiento de caña de azúcar en el Valle del Cauca, se procedió a elaborar el análisis de inventario del ciclo de vida en donde se identificaron y cuantificaron las entradas y las salidas de cada una de las etapas que conforman el sistema. Dentro de la cuantificación de los flujos de masas y energía se evaluó el consumo de materias primas, de energía y las corrientes de producto, coproductos, subproducto y los servicios proporcionados por este. Con esta información se calcularon las entradas y salidas con relevancia ambiental para cada etapa del ciclo de vida del proceso. Los cuadros de procesos que se muestran a continuación en KToneladas por año. Los resultados de la cuantificación de las corrientes se presentan en los diagramas de bloque de los procesos con sus respectivos balances de masa y energía y los aspectos ambientales relevantes de cada proceso. En la Figura 8, se muestran los procesos de preparación y lavado de la caña y la molienda, actividades que se realizan dentro de las instalaciones de los ingenios azucareros, en estos procesos se obtiene el 100% del bagazo generado en el Valle del Cauca y en las Tablas 21, 22 y 23 se presenta la descripción de los cálculos másicos y energéticos de dichos procesos.

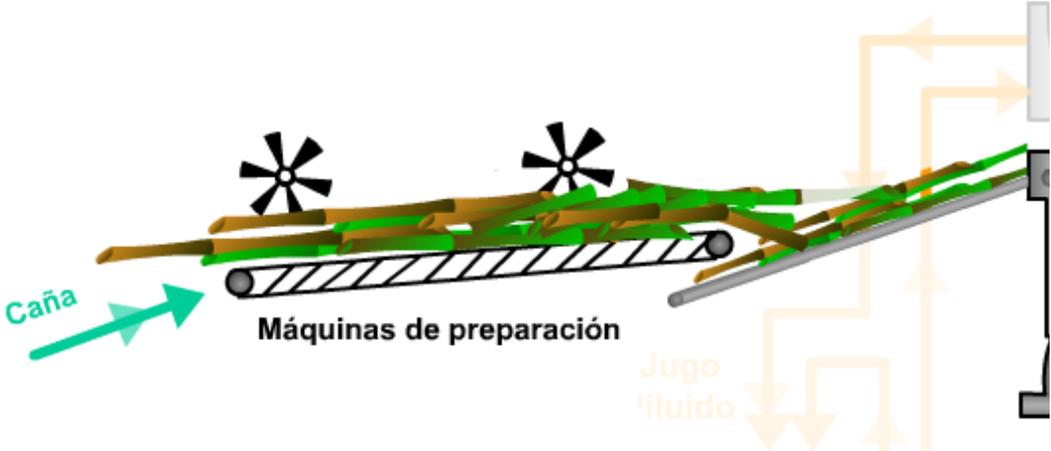




**Figura 8. Diagrama de Procesos de Preparación y lavado de la caña, y molienda**  
 Fuente: Elaboración propia, 2015



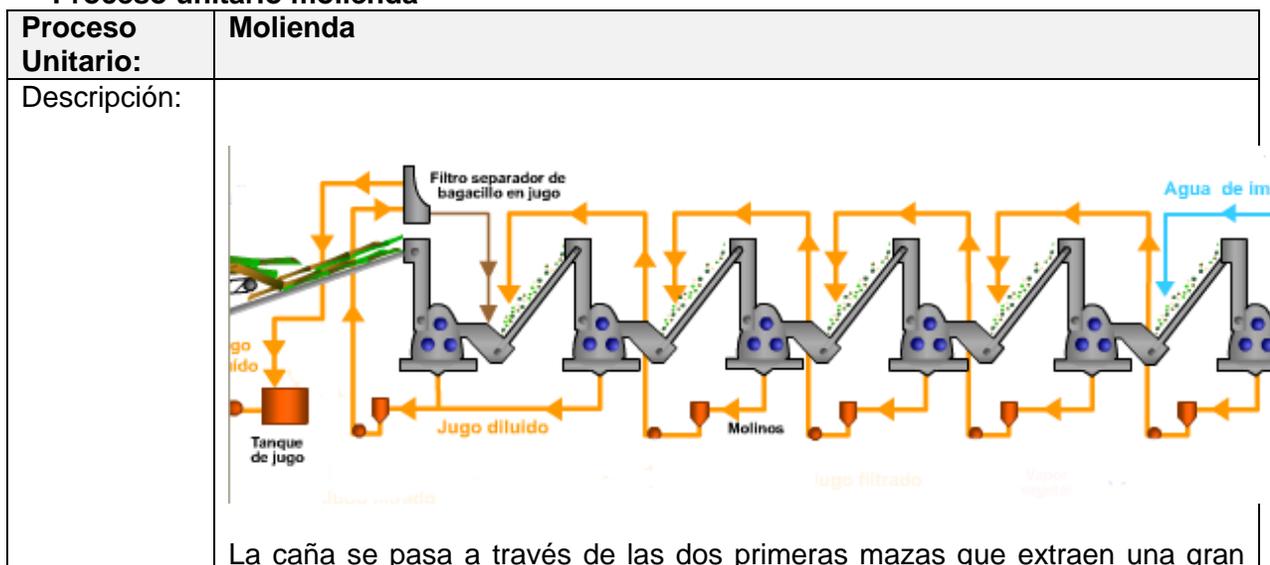
**Tabla 21:**  
**Proceso unitario preparación y lavado de la caña**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Proceso Unitario:</b>    | <b>Preparación y Lavado de la caña</b>  |
| Descripción:                |  <p>Fuente: Cenicaña</p> <p>La caña llega a la planta de procesamiento, en tractomulas o en carros cañeros. En la báscula se pesa y se muestrea para determinar la calidad, contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. La limpieza de caña se efectúa a través de sistemas de lavado. Esta práctica tiene por objeto retirar la mayor cantidad de materia extraña. Seguidamente, pasa a picadoras o trituradoras independientes en donde se astilla y se nivela el colchón de caña que entrará al molino.</p> |
| Equipos:                    | Grúa<br>Banda transportadora<br>Trituradora (cuchilla y desfibradoras)<br>Váscula   |
| Entradas:                   | <i>Caña de Azúcar con impurezas: 21000 KTon</i><br><i>Agua: 75000 KTon</i><br><i>Total entradas= 21000 KTon + 75000 KTon</i><br><i>Total entradas= 96000 KTon</i>   |
| Salidas:                    | <i>Caña de Azúcar: 20962.5 KTon</i><br><i>Agua residual con sólidos totales: 37.5 KTon de Sólidos totales + 75.000 KTon de Agua.= 75037.5 KTon</i><br><i>Total salidas= 20962.5 KTon + 75037.5 KTon</i><br><i>Total salidas= 96000 KTon</i>   |
| Condiciones del proceso:    | <i>Temperatura: Ambiente</i>  |
| Cálculo de Sólidos totales: | <i>Sólidos totales en agua de lavado: 500 mg/L</i><br>$500 \frac{mg}{L} * \frac{1 L}{1 Kg} * 75000 \text{ miles Ton Agua} * \frac{1000 Kg}{1 Ton} * \frac{Kg}{10^6} = 37500 \text{ miles Kg}$<br><i>= 37.5 miles Ton de Sólidos en el Agua Residual</i>   |

| Proceso Unitario:   | Preparación y Lavado de la caña   |
|---------------------|---|
| Consumo de Energía: | <p><i>Consumo de electricidad= Se calculó con base en la carga total de caña + agua</i></p> $Carga\ total\ ingenios = \frac{96'000,000\ Ton}{año} * \frac{1\ año}{340\ días} * \frac{1\ día}{24\ horas} = \frac{11765\ Ton}{hora}$ $Carga\ para\ cada\ Ingenio = \frac{11765\ \frac{Ton}{hora}}{13\ Ingenios} = \frac{905\ Ton}{hora}$ <p><b>Bandas transportadoras:</b> Para una Banda transportadora modelo B1200 se necesita una potencia de 15 KW<br/> <i>Total Potencia requerida Bandas transportadoras = 15*13=195 KW</i></p> $195\ \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340\ s}{año} * \frac{1GJ}{10^6KJ} = 5728.3\ \frac{GJ}{año}$ <p><b>Trituradoras:</b> Se utilizan cuchillas tipo swing back de 1000 hp por ingenio aproximadamente</p> $Consumo\ de\ Energía\ trituradoras\ de\ los\ ingenios = 13000\ hp * \frac{0.746KW}{1hp}$ $= 9700\ KW$ $9700\ \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340\ s}{año} * \frac{1GJ}{10^6KJ} = 284947.2\ \frac{GJ}{año}$ <p><b>Total gastos de energía en el proceso= 5728.3 + 284947.2 = 290675.5 <math>\frac{GJ}{año}</math></b></p> |

Fuente: Elaboración propia, 2015

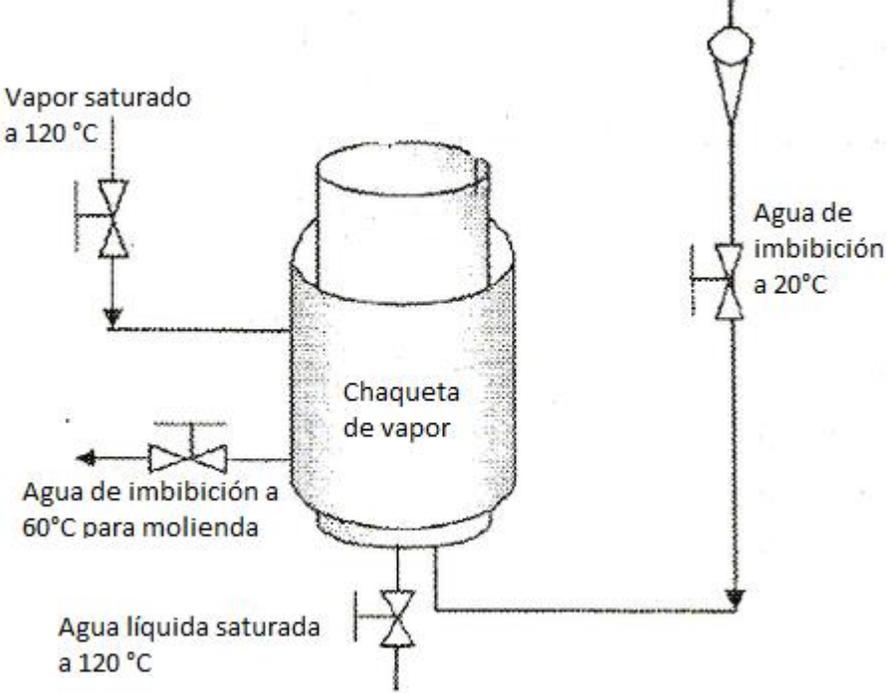
Tabla 22:  
Proceso unitario molienda



| Proceso Unitario:        | Molienda   |
|--------------------------|--|
|                          | cantidad de jugo (jugo de primera extracción). Luego pasa por una serie de molinos en tándem, cada uno de los cuales está compuesto por tres o cuatro mazas metálicas donde se macera la caña. El jugo de un molino se recicla al anterior y en el último molino se le añade el agua de imbibición. Al final, el jugo de primera extracción y el jugo diluido se mezclan (jugo mezclado). Este jugo se filtra para retirar el bagacillo y se bombea a un tanque de pesaje. El bagazo se conduce a una bagacera como combustible para las calderas, o se vende a la industria del papel.  |
| Equipos:                 | <i>Tándems de molinos</i>  |
| Entradas:                | <i>Caña de Azúcar: 20962.5 KTon</i><br><i>Agua de imbibición: 28% respecto al peso de la caña</i><br>$= 0.28 * 20962.5 = 5869.5 \text{ KTon}$<br><i>Total entradas= 20962.5 KTon + 5869.5 KTon</i><br><i>Total entradas= 26832 KTon</i>  |
| Salidas:                 | <i>Bagazo húmedo: 29% respecto al peso de la caña:</i><br>$= 0.29 * 20962.5 = 6079.125 \text{ KTon}$<br><i>Jugo de Caña de Azúcar diluido= Total mezcla de entrada – Bagazo húmedo</i><br>$= 26832 \text{ KTon} - 6079.125 \text{ KTon}$<br>$= 20752.875 \text{ KTon}$<br><i>Total salidas= 6079.125 KTon + 20752.875 KTon</i><br><i>Total salidas= 26832 KTon</i>   |
| Condiciones del proceso: | <i>Temperatura del agua: 60°C</i>  |
| Consumo de Energía:      | <i>Consumo de electricidad= Se calculó con base en la carga total de caña + agua de imbibición</i><br>$\text{Carga total ingenios} = \frac{26832000 \text{ Ton}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{340 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = \frac{3288 \text{ Ton}}{\text{hora}}$ $\text{Carga para cada Ingenio} = \frac{3288 \frac{\text{Ton}}{\text{hora}}}{13 \text{ Ingenios}} = \frac{253 \text{ Ton}}{\text{hora}}$<br>Consumo de Energía en Tándems de 6 molinos con una potencia de 1875 KW<br>$\text{Consumo de Energía molienda de los ingenios} = 13 * 1875 \text{ KW} = 24375 \text{ KW}$ $24375 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} * \frac{3600 * 24 * 340 \text{ s}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ GJ}}{10^6 \text{ KJ}} = 716040 \frac{\text{GJ}}{\text{año}}$<br><i>Total gastos de energía en el proceso= 716040 <math>\frac{\text{GJ}}{\text{año}}</math></i> |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 23:**  
**Proceso unitario calentamiento del agua de imbibición**

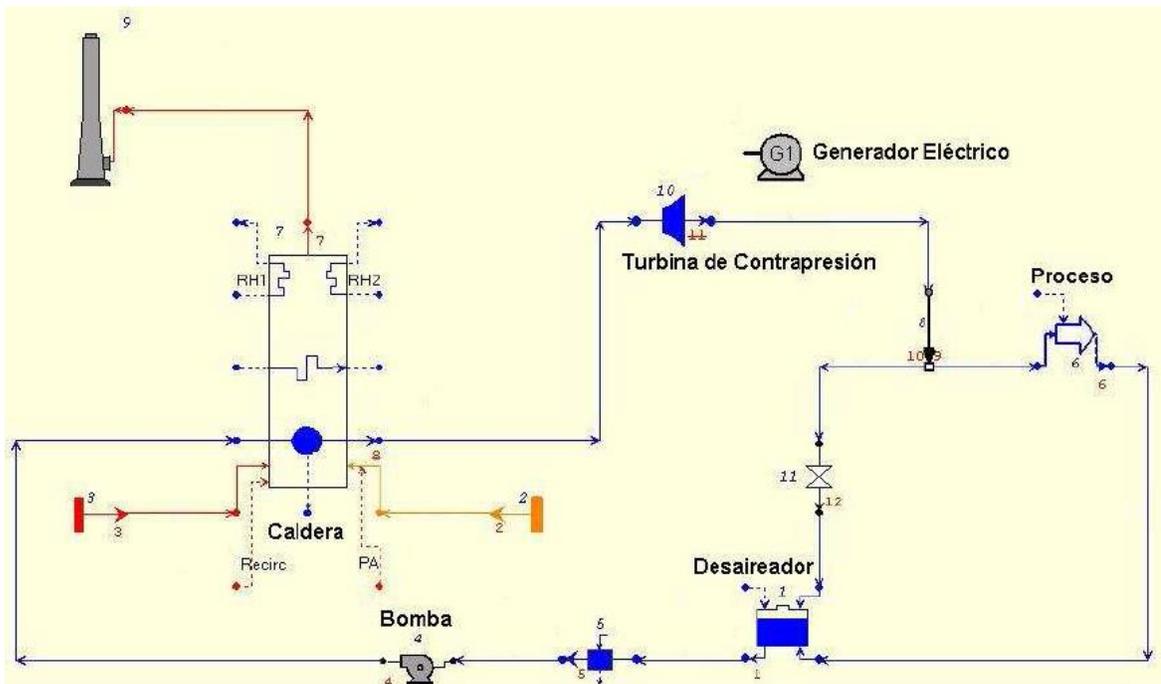
| Proceso Unitario:   | Calentamiento del agua de imbibición  |
|---------------------|---|
| Descripción:        |  <p>El agua de imbibición para extraer el jugo se utiliza a 60°C para mayor extracción del jugo. Para este proceso se utiliza una chaqueta de vapor proveniente del vapor generado por la caldera que ha pasado por la turbina.</p>  |
| Equipos:            | Intercambiador de calor con chaqueta de vapor   |
| Entradas:           | Agua de imbibición a 20°C = 5869.5 KTon   |
| Salidas:            | Agua de imbibición a 60°C = 5869.5 KTon   |
| Consumo de Energía: | <p>El agua de imbibición se calienta de 20 a 60°C con vapor saturado a 120°C que se enfría hasta líquido saturado a 120°C</p> $\frac{KJ}{Kg} = \frac{GJ}{KTON}$ <p>Vapor requerido:<br/> <i>Calor que cede vapor = Calor que recibe agua de imbibición</i><br/> <i>h = entalpía (energía de un fluido) (Yunus, 2009)</i><br/> <i>m = masa</i><br/> <i>cp = Capacidad calorífica</i><br/> <i>ΔT = Cambio de temperatura</i><br/> <i>m vapor (h vapor – h líquido saturado) = (m * cp * ΔT) agua de imbibición</i></p> $m \text{ vapor} = \frac{5869.5 \text{ KTon} * 4.184 \frac{GJ}{KTON * ^\circ C} * (60 - 20)^\circ C}{(2706 - 507) \frac{GJ}{KTON}} = 446.7 \text{ KTon}$ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

El 85% del bagazo de caña de azúcar generado en la molienda, es destinado a la cogeneración de energía y el 15% restante es trasladado hacia la planta de Carvajal Pulpa y Papel en donde será la materia prima para la producción de papel. Teniendo en cuenta estos porcentajes de destinación del bagazo, a continuación se describen por separado las dos formas de aprovechamiento consideradas en el presente estudio: Elaboración de papel y cogeneración.

#### 4.1.1 Cogeneración de energía

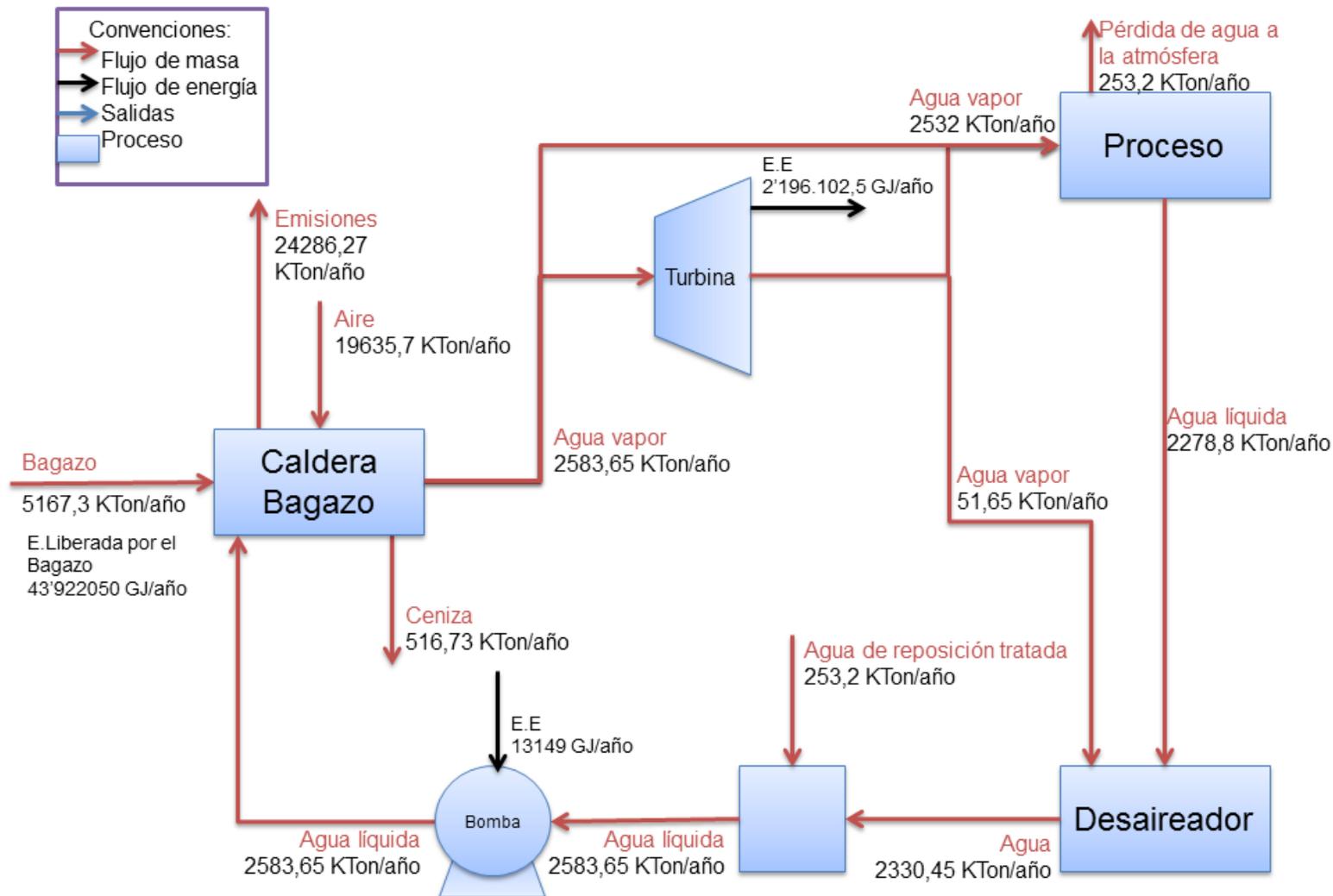
Del proceso unitario de molienda y pesaje, el bagazo es conducido dentro de los mismos ingenios al proceso de cogeneración como se observa en la Figura 9:



**Figura 9. Proceso de Cogeneración usual de los ingenios del Valle del Cauca**  
Fuente: (Acevedo Pinzón, 2009)

Este proceso consiste en un ciclo de vapor con turbina de contrapresión en donde el vapor de alta presión es producido por una caldera mediante la combustión del bagazo que es quemado con aire suministrado en una proporción de 3.8 veces la masa del bagazo. El vapor producido es expandido en la turbina, cuyo efluente es aprovechado como fuente de energía térmica en los procesos del ingenio. Por lo tanto, el proceso determina la cantidad de vapor producido en la caldera y por consiguiente, la cantidad de bagazo usado. Los efluentes del proceso son llevados a un desaireador, donde es calentado hasta la temperatura de saturación, con una pequeña corriente del efluente de la turbina, para eliminar algunos gases disueltos ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , etc) en el agua, que pueden ser perjudiciales para el ciclo. Una vez los gases disueltos han sido retirados del desaireador, se añade una corriente de reposición de agua, la cual restablece el flujo demandado por el ciclo. Seguidamente, el flujo resultante es llevado de nuevo a la caldera a través de una bomba, en donde tiene lugar el inicio del ciclo (Acevedo Pinzón, 2009).

En la Figura 10, se presenta el proceso típico de cogeneración dentro de los ingenios en donde se trabaja con el 85% del bagazo generado; en las tablas 24 a 28 se presenta la descripción de los cálculos másicos y energéticos de los procesos involucrados en la cogeneración de energía.



**Figura 10. Diagrama de procesos de cogeneración con bagazo**  
 Fuente: Elaboración propia, 2015



**Tabla 24:**  
**Proceso unitario alimentación de agua a la caldera de Bagazo**

| Proceso Unitario: | Alimentación de agua a la caldera de bagazo   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Bomba   |
| Entradas          | Bomba alimentadora:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua: Por cada 2 partes de bagazo, se utiliza 1 parte de agua en la bomba de alimentación = <math>5167.3/2 = 2583.65</math> KTon. El agua de alimentación a la caldera es la misma que pasa por la bomba.</li> </ul> Total entradas: 2583.65 KTon |
| Salidas           | Total salidas: 2583.65 KTon   |
| Energía           | Consumo de Energía: Por cada ingenio se usan bombas de 50hp. De los 13 Ingenios azucareros, 12 hacen cogeneración.<br>$50hp * 12 ingenios * \frac{0.746 KW}{hp} = 447.6 KW$ $447.6 \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340 s}{año} * \frac{1GJ}{10^6 KJ} = 13149 \frac{GJ}{año}$                                     |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 25:**  
**Proceso unitario producción de vapor en la caldera de bagazo**

| Proceso Unitario: | Producción de Vapor en la caldera de bagazo   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Caldera de alta presión   |
| Entradas          | Bagazo: 85% del bagazo total generado por los ingenios<br>$= 0.85 * 6079.125 \text{ KTon} = 5167.3 \text{ KTon}$<br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Aire: <math>3.8 * \text{masa de bagazo} = 3.8 * 5167.3 = 19635.74 \text{ KTon}</math></li> <li>- Agua: Por cada 2 partes de bagazo, se produce 1 parte de vapor = <math>5167.3/2 = 2583.65 \text{ KTon}</math></li> </ul> Total entradas caldera:<br>$5167.3 + 19635.74 + 2583.65 = 27386.7 \text{ KTon}$  |
| Salidas           | Vapor de agua = 2583.65 KTon<br>Ceniza: Es el 10% del bagazo (Acevedo Pinzón, 2009)<br>$= 0.1 * 5167.3 \text{ KTon} = 516.73 \text{ KTon}$<br>Emisiones = (Bagazo + Aire) – Ceniza<br>$= (5167.3 + 19635.7) - 516.73 = 24286.27 \text{ KTon}$<br>Composición de las emisiones en base libre de material particulado (Acevedo Pinzón, 2009) (Gil Unday, 2011)<br>CO (4.09%)= $24286.27 * 0.0409 = 993.31 \text{ KTon}$<br>CO2 (18.22%)= $24286.27 * 0.1822 = 4424.96 \text{ KTon}$<br>H2O (16.47%)= $24286.27 * 0.1647 = 4000 \text{ KTon}$<br>N2 (57.69%)= $24286.27 * 0.5769 = 14010.7 \text{ KTon}$<br>Argón (0.97%)= $24286.27 * 0.0097 = 235.6 \text{ KTon}$<br>SO2 (0.0001%)= $24286.27 * 0.000001 = 0.02428 \text{ KTon}$ |

| Proceso Unitario: | Producción de Vapor en la caldera de bagazo   |
|-------------------|---|
|                   | PST(2.56%)= 24286.27*0.0256= 621.7 KTon<br>Total salidas caldera:<br>2583.65+516.73+24286.27= 27386.7 KTon  |
| Energía           | Energía liberada por el bagazo en la caldera:<br>Poder calorífico del bagazo=8500KJ/Kg<br>Energía producida por año por la quema del bagazo (Garcés Paz & Martínez Silva, 2008)=<br>$8.5 \frac{MJ}{Kg} * 5167.3 \text{ miles Ton} * \frac{1000000 \text{ Kg}}{1 \text{ miles Ton}} * \frac{1GJ}{1000MJ} = 43922050GJ$ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 26:**

**Proceso unitario producción de energía en la turbina en proceso de bagazo**

| Proceso Unitario: | Producción de energía  |
|-------------------|--|
| Equipos           | turbina en proceso de bagazo   |
| Entradas          | Vapor de agua proveniente de la caldera = 2583.65 KTon   |
| Salidas           | Vapor de agua proveniente de la caldera = 2583.65 KTon<br>Vapor que se va para el proceso industrial de los ingenios (azúcar, alcohol, melaza): 98%<br>=2583.65*0.98= 2532 KTon<br>Vapor que se recircula a la caldera: 2%<br>= 2583.65*0.02= 51.65 KTon   |
| Energía           | Energía generada por la turbina:<br>La eficiencia térmica es el 5% debido a que una gran cantidad de vapor proveniente de la caldera es desviada al proceso de los Ingenios azucareros pasando solamente una parte del vapor por la turbina (Acevedo Pinzón, 2009):<br>43'922050GJ*0.05= 2'196102,5 GJ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 27:**

**Proceso unitario desaireación en proceso de Bagazo**

| Proceso Unitario: | Desaireación en proceso de Bagazo  |
|-------------------|--|
| Equipos           | Desaireador  |
| Entradas          | Vapor que viene de la turbina: 51.65 KTon<br>Agua líquida que viene del proceso (sólo se recupera el 90%):<br>2532*0.9= 2278.8 KTon<br>Total entradas= 51.65 + 2278.8 = 2330.45 KTon |
| Salidas           | 2330.45 KTon   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 28.**  
**Proceso unitario reposición de agua en proceso de Bagazo**

| Proceso Unitario: | Reposición de agua en proceso de bagazo  |
|-------------------|--|
| Equipos           | Tanque   |
| Entradas          | Agua del desaireador: 2330.45 KTon<br>Agua de reposición (10% que se perdió en purgas de proceso):<br>2532*0.1= 253.2 KTon<br>Total entradas: 2330.45 + 253.2 = 2583.65 KTon |
| Salidas           | 2583.65 KTon   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

La energía requerida para accionar las válvulas del sistema de control automático es de 110.2 KW. Por consiguiente por año se consume:

$$110.2 \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340 s}{año} * \frac{1GJ}{10^6 KJ} = 13148.76 \frac{GJ}{año}$$

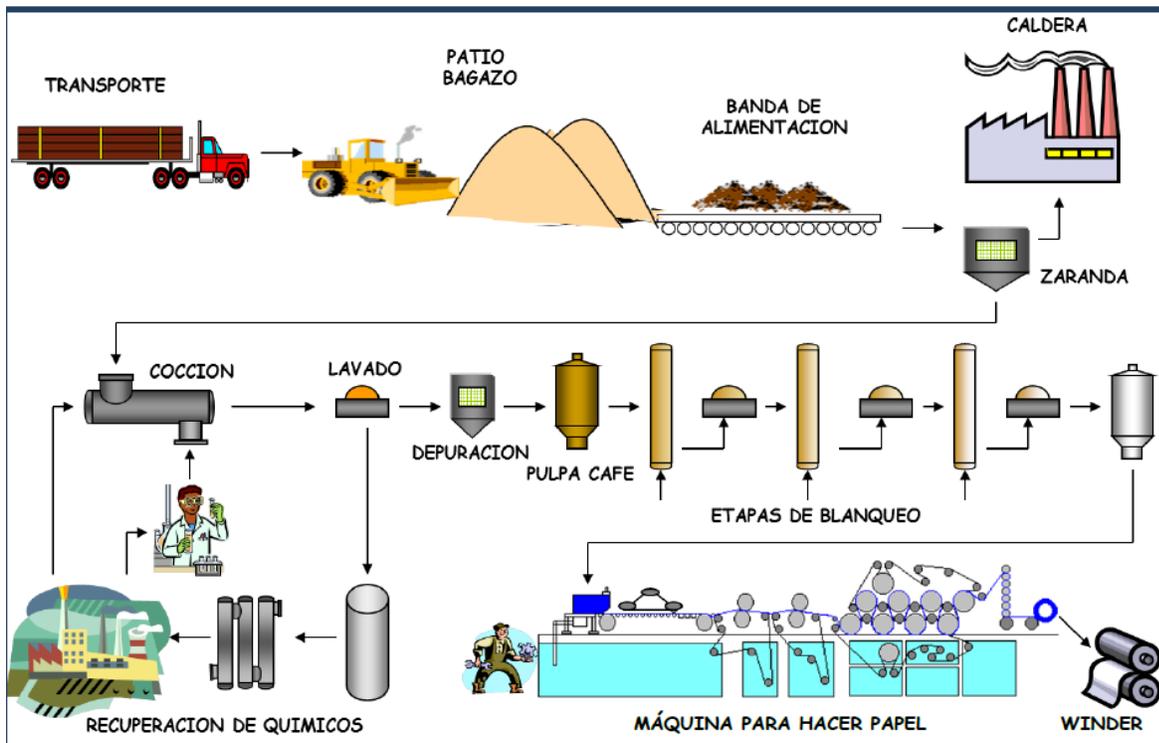
#### 4.1.2 Elaboración de Papel

El bagazo, es transportado desde los ingenios en tracto camiones bagaceros al patio de bagazo de la planta de Carvajal Pulpa y Papel, en donde es pesado y descargado por unas retroexcavadoras para su posterior almacenamiento. En el Patio de almacenamiento o patio Bagazo, El bagazo es almacenado a la intemperie y mezclado continuamente por las retroexcavadoras. En la Figura 11, se muestra el proceso para la elaboración de papel y en la Figura 12, se presentan el diagrama de flujo del proceso de aprovechamiento del bagazo para la producción de papel, teniendo en cuenta el transporte de los ingenios a las plantas de Carvajal Pulpa y Papel, cuyas distancias de los ingenios a la planta de Carvajal Pulpa y Papel se relacionan en la Tabla 29. Las tablas 30 a 35, describen los respectivos cálculos de los balances de masa y energía

**Tabla 29:**  
**Distancias de los ingenios a la planta de Carvajal Pulpa y Papel**

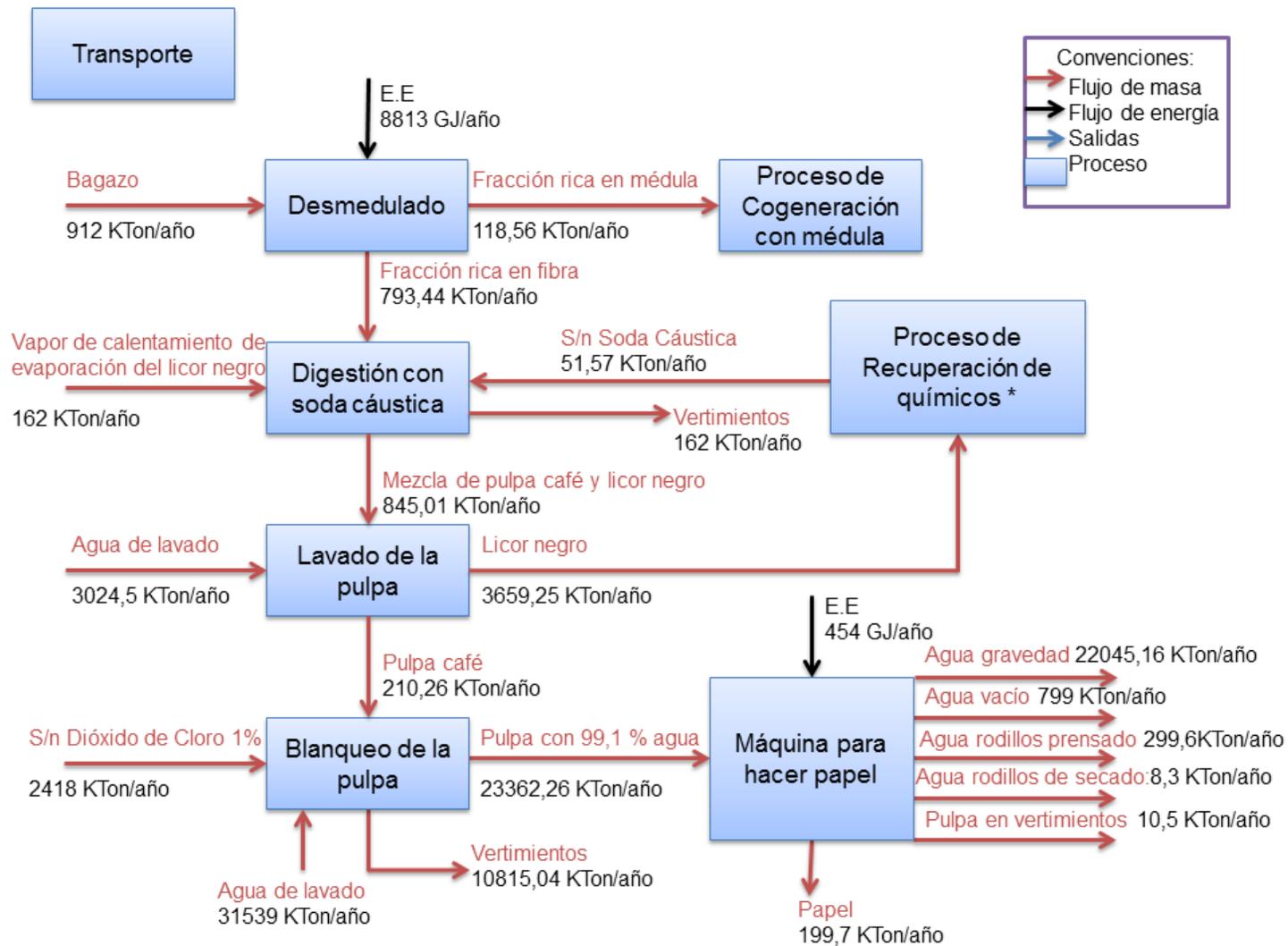
| Ingenio | Nombre         | Distancia a Carvajal Pulpa y Papel<br>Distancia mas corta(km) |
|---------|----------------|---|
| 1       | La Cabaña      | 50,2  |
| 2       | Carmelita      | 82,6  |
| 3       | Manuelita      | 71,7  |
| 4       | Maria Luisa    | 50,4  |
| 5       | Mayagüez       | 43,4  |
| 6       | Pichichi       | 47,2  |
| 7       | Risaralda      | 191   |
| 8       | Sancarlos      | 77,7  |
| 9       | Riopaila       | 115   |
| 10      | Castilla       | 46,4  |
| 11      | Incauca        | 77,5  |
| 12      | Providencia    | 42,4  |
| 13      | Central Tumaco | 27,5  |

Fuente: Autora



**Figura 11. Proceso de elaboración de papel**

Fuente: (Gomez Londoño, 2012)



**Figura 12. Diagrama de procesos producción de papel**

Fuente: Elaboración propia, 2015



**Tabla 30:**  
**Proceso unitario desmedulado**

| Proceso Unitario:       | Desmedulado  |
|-------------------------|--|
| Descripción:            | El bagazo es agitado, golpeado y centrifugado por medio de líneas de desmeduladores, para realizar la separación fibra/médula, los equipos poseen paquetes de martillos que golpean el bagazo integral contra cribas que permiten el pasaje (rechazo) de la médula y la retención (aceptado) de la fracción rica en fibra, para después ser lavado y enviado a la sección de cocción.  |
| Equipos                 | Desmeduladores, en algunos casos es llamada zaranda  |
| Entradas                | <p>Bagazo húmedo: 15% del bagazo total generado por los ingenios<br/> <math>= 0.15 * 6079.125 \text{ KTon} = 912 \text{ KTon}</math></p> <p>*Composición del bagazo húmedo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fibra (43,5%) = 396.7 KTon</li> <li>- Médula (6,5%) = 59.3 KTon</li> <li>- Agua (50%) = 456 kg</li> </ul> <p>Total Entradas= 912 KTon</p>   |
| Salidas                 | <p>Fracción rica en fibra: 87% del bagazo húmedo:<br/> <math>= 0.87 * 912 \text{ KTon} = 793.44 \text{ KTon}</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- celulosa y hemicelulosa (39%) = <math>0.39 * 793.44 \text{ KTon} = 309.45 \text{ KTon}</math></li> <li>- Lignina (10%) = <math>0.1 * 793.44 \text{ KTon} = 79.34 \text{ KTon}</math></li> <li>- Componentes solubles en agua (1%) (alcoholes, ácidos grasos, fenoles, resinas) = <math>0.01 * 793.44 \text{ KTon} = 7.93 \text{ KTon}</math></li> <li>- Agua (50%) = <math>0.5 * 793.44 \text{ KTon} = 396.72 \text{ KTon}</math></li> </ul> <p>Fracción rica en médula: 13% del bagazo húmedo:<br/> <math>= 0.13 * 912 \text{ KTon} = 118.56 \text{ KTon}</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Médula (50%) = <math>0.5 * 118.56 \text{ KTon} = 59.28 \text{ KTon}</math></li> <li>- Agua (50%) = <math>0.5 * 118.56 \text{ KTon} = 59.28 \text{ KTon}</math></li> </ul> <p>Total Salidas= <math>309.45 + 79.34 + 7.93 + 396.72 + 59.28 + 59.28</math><br/> Total Salidas= 912 KTon</p> |
| Condiciones del proceso | Temperatura: Ambiente  |
| Consumo de Energía:     | <p>El desmedulador opera a 1150 rpm y con una potencia de 300 KW (Correa JA, 2012)</p> <p>Consumo de energía= <math>\frac{300 \text{ KJ}}{\text{s}} * \frac{3600 * 24 * 340 \text{ s}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ GJ}}{10^6 \text{ KJ}} = 8813 \frac{\text{GJ}}{\text{año}}</math></p>   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 31:**  
**Proceso unitario preparación de la solución de soda**

| Proceso Unitario: | Preparación de la solución de soda  |
|-------------------|---|
| Descripción:      | El NaOH que va a entrar al digestor debe estar al 1%, para lo cual se disuelve en agua NaOH seco proveniente tanto del proceso de recuperación de químicos como de NaOH comercial.  |
| Equipos           | Tanque de disolución  |
| Entradas          | <p><i>Solución NaOH que viene del clarificador al 0.835% (ver tabla 25)= 21.56 KTon:</i><br/> <i>-NaOH seco= 0.18 KTon</i><br/> <i>-Agua= 21.38 KTon</i><br/> <i>Balance de materia NaOH seco:</i><br/> <i>NaOH seco que sale del proceso = NaOH que sale del clarificador + NaOH requerido en Solución comercial al 50%</i><br/> <i>- NaOH requerido en Solución comercial al 50%= 0.5157 -0.18 = 0.3357 KTon</i><br/> <i>- Agua requerida en Solución comercial de NaOH al 50% = 0.3357 KTon</i><br/> <i>Balance de materia de agua para solución de NaOH:</i><br/> <i>Agua en solución de NaOH al 1% = 51.57*0.99=51.0543 KTon</i><br/> <i>Agua de solución final al 1% = Agua que sale del clarificador + Agua de solución comercial de NaOH al 50% + Agua adicional requerida</i><br/> <i>- Agua adicional requerida = 51.543 - 21.38 - 0.3357 = 29.34 KTon</i><br/> <i>Total entradas=0.18 + 21.38 + 0.3357 + 0.3357 + 29.34 = 51.57 KTon</i></p> |
| Salidas           | <i>Solución de NaOH al 1% = 51.57 KTon</i>  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 32:**  
**Proceso unitario digestión con soda cáustica**

| Proceso Unitario: | Digestión con soda cáustica   |
|-------------------|---|
| Descripción:      | La fibra de bagazo es sometida a un proceso de cocción con soda cáustica, vapor de alta presión y temperatura. En este proceso, la lignina del bagazo se extrae hasta descomponerla quedando solo la fibra y una lignina residual que luego se degrada con el proceso de blanqueamiento; la lignina es el “cemento” natural que une a las fibras de los vegetales en forma de haces fibrosos. Esta operación se efectúa en digestores continuos. Durante este proceso de cocción la fibra es conducida por un grupo de tres tornillos sin fin o tubos digestores, este proceso involucra temperatura y presión de vapor constante, este vapor ingresa por cada tubo para compensar las pérdidas térmicas durante la cocción. En este tiempo de cocimiento se continúa agregando soda y algunos químicos como carbonatos. El producto final de la extracción de la lignina se denomina licor negro del cual, una parte es enviada a la sección de evaporadores para pulverizarlo, y otra es enviada nuevamente por recirculación al proceso como licor de cocción. |
| Equipos           | Digestor con Chaqueta de Vapor  |
| Entradas          | <p><i>- Solución de Hidróxido de sodio al 1% dosificada al 13% de solución de soda en base seca, es decir por cada 100 gr de fracción seca rica en fibra:</i><br/> <math>793.44 \text{ KTon Fracción Húmeda rica en fibra} * 0.5</math><br/> <math>= 396.72 \text{ KTon de Fracción Seca rica en fibra}</math></p>  |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Proceso Unitario:</b>       | <b>Digestión con soda cáustica</b>   |
|                                | <p style="text-align: center;"><i>Solución NaOH al 1%</i></p> $= 396.72 \text{ KTon Fracción seca} * \frac{13 \text{ KTon de Solución NaOH}}{100 \text{ KTon Fracción seca}}$ <p>= 51.6 KTon de Solución NaOH (0.516 KTon de NaOH seco + 51.05 KTon de Agua)</p> <p>- Fracción rica en fibra: 87% del bagazo húmedo = 793.44 KTon compuesta químicamente por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- celulosa y hemicelulosa (39%) = 309.45 KTon</li> <li>- Lignina (10%) = 79.34 KTon</li> <li>- Componentes solubles en agua (1%) (alcoholes, ácidos grasos, fenoles, resinas) = 7.93 KTon</li> <li>- Agua (50%) = 396.72 KTon</li> </ul> <p>Total entradas digestor = 51.57 KTon + 793.41 KTon<br/>         Total entradas digestor = 845.01 KTon</p>   |
| <b>Salidas</b>                 | <p><i>Mezcla de Pulpa café y Licor negro:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulpa café (rendimiento en producción de pulpa 53% con base en fracción rica en fibra seca) = 210.26 KTon</li> <li>- Licor negro: NaOH remanente, componentes solubles en agua, lignina fragmentada (compuestos fenólicos), fracciones degradadas de celulosa y hemicelulosa y Agua = Total entradas al digestor – Pulpa (www.esi.uva.es)<br/>                 Licor negro = 845.01 KTon – 210.26 KTon<br/>                 = 634.75 KTon</li> </ul> <p>Total salidas digestor = 210.26 KTon + 634.75 KTon<br/>         Total salidas digestor = 845.01 KTon</p>  |
| <b>Condiciones del proceso</b> | <p>T°=160°C<br/>         Duración del proceso: 20 min.<br/>         Presión: 8 bar</p>   |
| <b>Consumo de Energía:</b>     | <p><i>Se requiere calentar el digestor a 160°C por lo que se utiliza una chaqueta de vapor con vapor saturado a 200°C que se enfría hasta líquido saturado a 200°C.</i></p> $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = \frac{\text{GJ}}{\text{KTON}}$ <p><b>Vapor requerido:</b><br/>         Calor que cede vapor = Calor que recibe<br/> <math>h = \text{entalpía (energía de un fluido)}</math> (Yunus, 2009)<br/> <math>m = \text{masa}</math><br/> <math>cp = \text{Capacidad calorífica}</math><br/> <math>cp \text{ de la fibra} = 0.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}</math> (Yunus, 2009)<br/> <math>cp \text{ de NaOH} = 1.46 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}</math> (Yunus, 2009)<br/> <math>cp \text{ de Agua} = 4.184 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}</math> (Yunus, 2009)<br/> <math>\Delta T = \text{Cambio de temperatura}</math><br/>         El calor que cede el vapor es igual al calor que reciben la fibra, la soda y el agua más el 10 % (representado por 1,1) para compensar las pérdidas de calor al ambiente</p> |

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Proceso Unitario:</b> | <b>Digestión con soda cáustica</b>  |
|                          | $m \text{ vapor } (h \text{ vapor} - h \text{ líquido saturado}) = ((m * cp * \Delta T) \text{fibra} + (m * cp * \Delta T) \text{NaOH} + (m * cp * \Delta T) \text{Agua}) * 1.1$ $m \text{ vapor} = \frac{(396.72 * 0.4 + 0.516 * 1.46 + 447.87 * 4.184) \text{KTON} * \frac{\text{GJ}}{\text{KTON} * ^\circ\text{C}} * (160 - 20)^\circ\text{C}}{(2793 - 858) \frac{\text{GJ}}{\text{KTON}}} * 1.1$ $= 162 \text{ KTON}$ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 33:**  
**Proceso unitario lavado de la pulpa**

| <b>Proceso Unitario:</b> | <b>Lavado de la Pulpa</b>   |
|--------------------------|---|
| Descripción:             | El proceso de lavado tiene como objetivo quitar todas las impurezas y separar de la pulpa cocida el licor negro que la acompaña; por medio de filtros lavadores en contracorriente donde es separada del licor residual del cocimiento, más conocido como "licor negro"; este licor se procesa en el anillo de recuperación, donde es reconvertido en soda cáustica para su nueva utilización. La pulpa lavada es sometida a un proceso de selección y limpieza para luego ser almacenada en una torre o tanque.              |
| Equipos                  | Filtro de mallas  |
| Entradas                 | <p><i>Mezcla de Pulpa café y Licor negro:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulpa café = 210.26 KTon</li> <li>- Licor negro = 634.75 KTon</li> </ul> <p><i>Agua de lavado = Se utiliza en una proporción de 93.5% de agua por cada 6.5% de pulpa</i></p> $\text{Agua de Lavado} = 210.26 \text{ KTon de pulpa} * \frac{93.5 \text{ KTon de agua}}{6.5 \text{ KTon de Pulpa}}$ <p><i>Agua de Lavado = 3024.5 KTon</i></p> <p><i>Total entradas = 210.26 KTon + 634.75 KTon + 3024.5 KTon = 3869.51 KTon</i></p> |
| Salidas                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulpa café = 210.26 KTon</li> <li>- Mezcla de Licor negro y agua remanente:</li> </ul> <p><i>Licor negro = 634.75 KTon</i></p> <p><i>Agua remanente = 3024.5 KTon</i></p> <p><i>Mezcla de Licor negro más agua de Lavado = 3659.25 KTon</i></p> <p><i>Total salidas = 3869.51 KTon</i></p>   |
| Condiciones del proceso  | Normales  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 34:**  
**Proceso unitario blanqueo de la Pulpa**

| Proceso Unitario:    | Blanqueo de la pulpa   |
|----------------------|--|
| Descripción:         | Proceso que se da para retirar la lignina residual que le confiere el color marrón a la pulpa. Esto se logra paulatinamente a lo largo del proceso de blanqueo por reacciones químicas que ocurren en cada una de las etapas (torres de retención y posterior lavado por filtración) para eliminar los productos de cada reacción. Cuando la pulpa ya está blanqueada esta se almacena en unos tanques.  |
| Equipos              | Filtro depurador   |
| Entradas             | <p><i>Pulpa café = 210.26 KTon</i><br/> <i>Solución de dióxido de Cloro al 1% (8% de fibra en solución acuosa)=</i></p> $210.26 \text{ KTon Pulpa café} * \frac{92 \text{ KTon sln ClO}_2}{8 \text{ KTon Pulpa café}} = 2418 \text{ KTon sln ClO}_2$ <p>Agua de lavado (por cada 100 Ton de pulpa se utilizan 150000 Ton de agua):</p> $\text{Agua de lavado} = 210.26 \text{ KTon Pulpa} * \frac{150000 \text{ KTon agua}}{1000 \text{ KTon Pulpa}}$ $= 31539 \text{ KTon agua}$ <p><i>Total entradas = 210.26 KTon + 2418 KTon + 31539 KTon = 34167.3 KTon</i></p> |
| Salidas              | <p><i>Pulpa con 99.1% de agua:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Agua: 210.26 KTon Pulpa * <math>\frac{99.1 \text{ KTon Agua}}{0.9 \text{ KTon Pulpa}}</math></i></li> <li><i>Agua: 23152 KTon Agua</i></li> <li>- <i>Pulpa: 210.26 KTon Pulpa</i></li> </ul> <p><i>Pulpa con agua = 23152 KTon + 210.26 KTon</i><br/> <i>= 23352.26 KTon</i></p> <p><i>Agua de Vertimientos = 34167.3 KTon - 23352.26 KTon</i><br/> <i>= 10815.04 KTon</i></p> <p><i>Total salidas = 23352.26 + 10815.04 = 34167.3 KTon</i></p>                                   |
| Aspectos ambientales | <p>Vertimientos:</p> <p>La DBO del agua efluente de este proceso es de aproximadamente 800 mg/L y el máximo permisible en Colombia según la resolución 631 de 2015 es de 500 mg/L</p> <p>La DQO del agua efluente de este proceso es de aproximadamente 2500 mg/L y el máximo permisible en Colombia según la resolución 631 de 2015 es de 900 mg/L</p>  |

Fuente: Autora

**Tabla 35:**  
**Proceso unitario máquina para hacer papel**

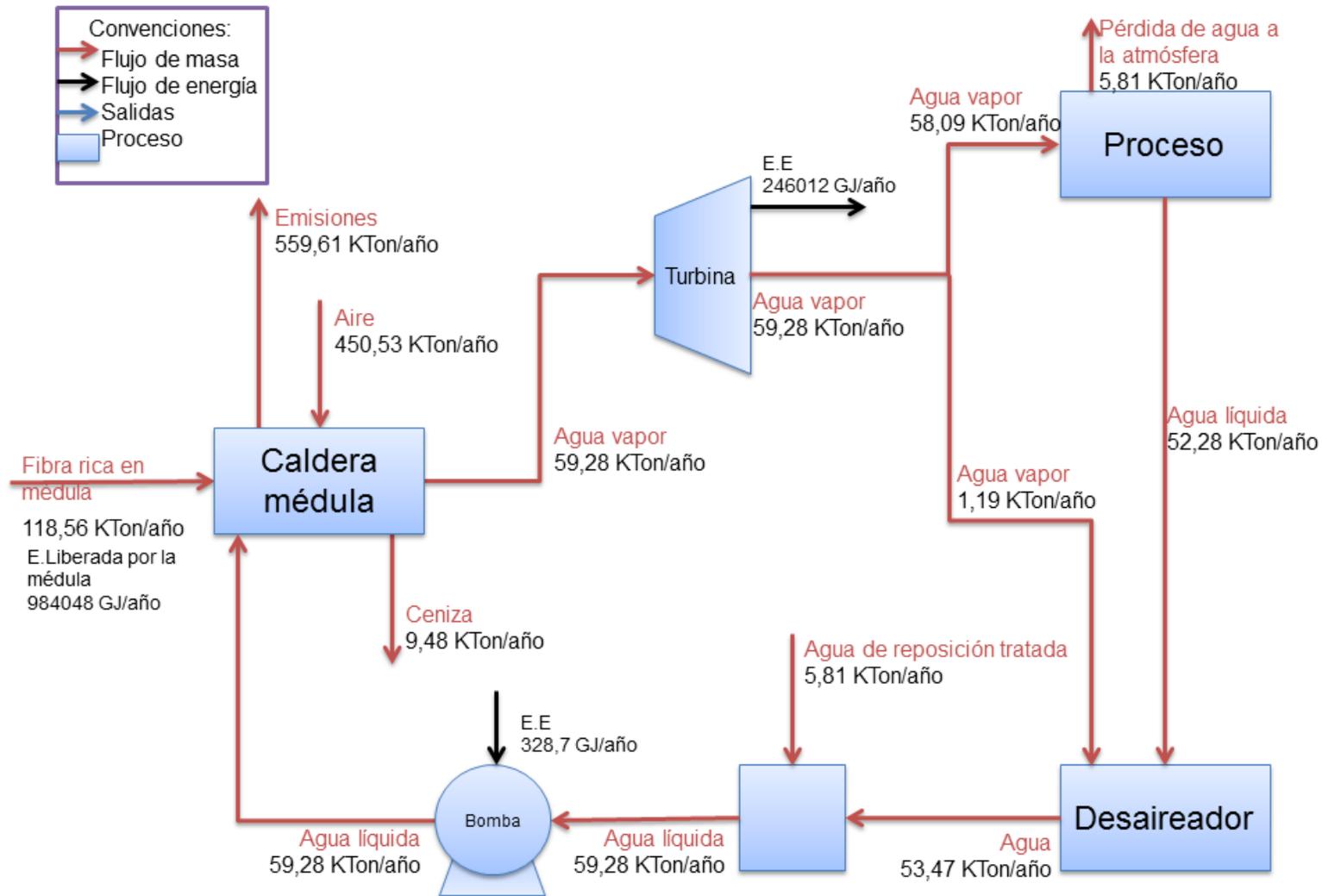
| Proceso Unitario: | Máquina para hacer papel  |
|-------------------|---|
| Descripción:      | La pulpa que entra a la máquina tiene 99.1% de agua y el papel final tiene 4% de agua por lo que se debe de realizar un proceso de secado en esta máquina. Para iniciar el proceso de secado la pulpa entra a una malla de formación en donde parte del agua sale por gravedad, seguidamente la pulpa entra a unos rodillos que le hace presión para posteriormente entrar a unos rodillos secadores que van a terminar de retirar el agua de la pulpa para que se forme el papel. Al final de la maquina hay unos tubos metálicos llamados spool que sirven para enrollar el papel y generar rollos gigantes llamados reeles, estos tiene 6mt de ancho y 2mt de diámetro en la máquina que produce el papel para Zona Franca, estos reeles son cortados en la máquina rewinder a la cual se le ingresa todo el reel y salen los rollos a la medida de las máquinas cortadoras.   |
| Equipos           | Máquina para hacer papel con mesa de fabricación, rodillos de prensado y rodillos de secado.  |
| Entradas          | <p><i>Agua: 23152 KTon Agua</i><br/> <i>Pulpa: 210.26 KTon Pulpa</i><br/> <i>Total entradas: 23362.26 KTon</i></p>  |
| Salidas           | <p>- <i>Papel (5% pérdidas por impurezas y adherencia a maquinaria en los procesos): 210.26*0.95 KTon Pulpa = 199.7 KTon de Papel</i></p> <p>- <i>Agua:</i></p> <p><i>1. Mesa de Fabricación:</i><br/> <i>Primera fase: Pérdida de agua por gravedad (95.22% de agua es retirada):</i><br/> <i>Agua perdida por gravedad= 23152*0.9522= 22045.16 KTon</i><br/> <i>Segunda fase: Pérdida de agua por vacío (80% de agua y 20% de pulpa):</i><br/> <i>- Agua: 199.7 KTon Pulpa * <math>\frac{80\% \text{ Agua}}{20\% \text{ Pulpa}} = 799 \text{ KTon}</math></i></p> <p><i>2. Rodillos de Prensado (60% de agua y 40% de pulpa):</i><br/> <i>Agua: 199.7 KTon Pulpa * <math>\frac{60\% \text{ Agua}}{40\% \text{ Pulpa}} = 299.6 \text{ KTon}</math></i></p> <p><i>3. Rodillos de secado (4% de agua y 96% de pulpa):</i><br/> <i>Agua: 199.7 KTon Pulpa * <math>\frac{4\% \text{ Agua}}{96\% \text{ Pulpa}} = 8.3 \text{ KTon}</math></i></p> <p><i>Pulpa en vertimientos: 210.26*0.05 = 10.5 KTon</i></p> <p><i>Total salidas: 22045.16 + 199.7 + 799 + 299.6 + 8.3 + 10.5</i><br/> <i>Total salidas: 23362.26</i></p> |
| Energía           | La máquina de hacer papel consume 0.6 KWH por cada tonelada de  |

| Proceso Unitario:    | Máquina para hacer papel   |
|----------------------|--|
|                      | pulpa de papel a procesar<br>$\frac{0.6 \text{ KWH}}{\text{Ton}} * \frac{210.26 \text{ KTon}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ Ton}}{\text{KTon}} * \frac{3600 \text{ KJ}}{\text{KWH}} * \frac{1 \text{ GJ}}{10^6 \text{ KJ}} = \frac{454 \text{ GJ}}{\text{año}}$      |
| Aspectos Ambientales | Caracterización de los vertimientos de la Máquina de hacer papel:<br>Vertimientos=Total entradas a la máquina para hacer papel – Papel producido<br>Vertimientos= 23362.26 - 199.7 = 23162.56 KTon<br>Sólidos suspendidos= Pérdidas de Pulpa en el proceso = 10.5 KTon |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Como se puede observar en la Figura 12, que describe los procesos involucrados en la producción de papel, la fracción rica en médula que se obtiene del proceso de desmedulado, es conducida a un proceso de cogeneración, por lo que fue necesario realizar los balances de masa y energía de este proceso. En la Figura 13, se muestra el proceso de cogeneración con médula de bagazo de caña de azúcar que se lleva a cabo en Carvajal Pulpa y Papel, y las tablas 36 a la 40 muestran los balances de masa y energía de dicho proceso.





**Figura 13. Diagrama de procesos de cogeneración con médula**  
Fuente: Autora



**Tabla 36:**

**Proceso unitario alimentación de agua a la caldera de la médula**

| Proceso Unitario: | Alimentación de agua a la caldera de la médula   |
|-------------------|--|
| Equipos           | Bomba  |
| Entradas          | Bomba alimentadora:<br>- Agua: Por cada 2 partes de médula, se utiliza 1 parte de agua en la bomba de alimentación = $118.56/2 = 59.28$ KTon.<br>El agua de alimentación a la caldera es la misma que pasa por la bomba.<br>Total entradas: 59.28 KTon |
| Salidas           | Total salidas: 59.28 KTon  |
| Energía           | Consumo de Energía: Utilizan una bomba de 15 hp<br>$15hp * \frac{0.746 KW}{hp} = 11.19 KW$ $11.19 \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340 s}{año} * \frac{1GJ}{10^6 KJ} = 328.7 \frac{GJ}{año}$   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 37:**

**Proceso unitario producción de vapor en la caldera de médula**

| Proceso Unitario: | Producción de Vapor en la caldera de médula   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Caldera de alta presión   |
| Entradas          | Fracción rica en médula = 118.56 KTon<br>- Aire: $3.8 * \text{Fracción rica en médula} = 3.8 * 118.56 = 450.53$ KTon<br>- Agua: Por cada 2 partes de médula, se produce 1 parte de vapor = $118.56/2 = 59.28$ KTon<br>Se necesita 165.3 vapor de agua para el proceso de digestión.<br>Total entradas caldera:<br>$118.56 + 450.53 + 59.28 = 628.37$ KTon   |
| Salidas           | Vapor de agua = 59.28 KTon<br>Ceniza: Es el 8% de la médula (Acevedo Pinzón, 2009)<br>$= 0.08 * 118.56$ KTon = 9.48 KTon<br>Cálculo de Emisiones:<br>(Médula + Aire) – Ceniza<br>$= (118.56 + 450.53) - 9.48 = 559.61$ KTon<br>Composición de las emisiones en base libre de material particulado (Acevedo Pinzón, 2009) (Gil Unday, 2011)<br>CO (4.09%) = $559.61 * 0.0409 = 22.89$ KTon<br>CO <sub>2</sub> (18.22%) = $559.61 * 0.1822 = 101.96$ KTon<br>H <sub>2</sub> O (16.47%) = $559.61 * 0.1647 = 92.17$ KTon<br>N <sub>2</sub> (57.69%) = $559.61 * 0.5769 = 322.84$ KTon<br>Argón (0.97%) = $559.61 * 0.0097 = 5.43$ KTon<br>SO <sub>2</sub> (0.0001%) = $559.61 * 0.000001 = 0.0006$ KTon<br>PST(2.56%) = $559.61 * 0.0256 = 14.32$ KTon<br>Total salidas caldera: |

| Proceso Unitario: | Producción de Vapor en la caldera de médula   |
|-------------------|---|
|                   | 559.61+59.28+9.48= 628.37KTon   |
| Energía           | Energía liberada por la médula:<br>Poder calorífico de la médula=8300KJ/Kg=8300 GJ/KTon<br>Energía producida por año por la quema del bagazo (Garcés Paz & Martínez Silva, 2008)=<br>$8300 \frac{GJ}{Kton} * 118.56 Kton = 984048 GJ$ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 38:**  
**Proceso unitario Producción de energía de la médula**

| Proceso Unitario: | Producción de energía de la médula  |
|-------------------|---|
| Equipos           | Turbina   |
| Entradas          | Vapor de agua proveniente de la caldera = 59.28 KTon  |
| Salidas           | Vapor de agua proveniente de la caldera = 59.28 KTon<br>Vapor que se va para el proceso industrial de producción de papel =59.28*0.98= 58.09 KTon<br>Vapor que se recircula a la caldera: 2%<br>= 59.28*0.02= 1.19 KTon |
| Energía           | Energía generada por la turbina:<br>La eficiencia térmica es el 25%, porque todo el vapor pasa por la turbina (Acevedo Pinzón, 2009):<br>984048GJ*0.25= 246012 GJ   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 39:**  
**Desaireación en el ciclo de la médula**

| Proceso Unitario: | Desaireación en el ciclo de la médula   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Desaireador   |
| Entradas          | Vapor que viene de la turbina: 1.19 KTon<br>Agua líquida que viene del proceso (sólo se recupera el 90%):<br>58.09*0.9= 52.28 KTon<br>Total entradas= 1.19 + 52.28 = 53.47 KTon |
| Salidas           | 53.47 KTon  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 40:**  
**Reposición de agua en el ciclo de la médula**

| Proceso Unitario: | Reposición de agua en el ciclo de la médula   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Tanque  |
| Entradas          | Agua del desaireador: 53.47 KTon<br>Agua de reposición (10% que se perdió en purgas de proceso):<br>58.09*0.1= 5.81 KTon<br>Total entradas: 53.47 + 5.81 = 59.28 KTon |
| Salidas           | 59.28 KTon  |

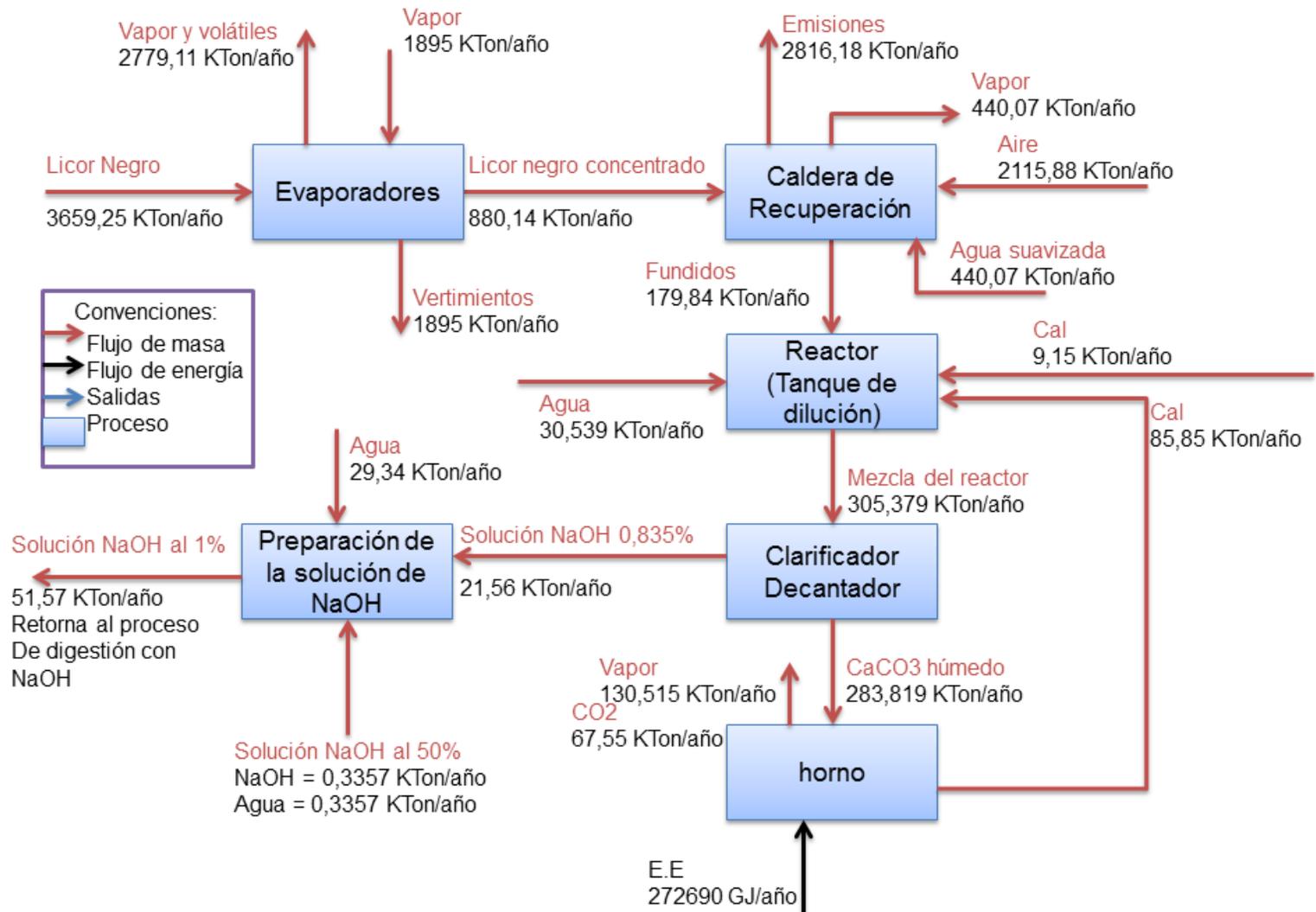
Fuente: Elaboración propia, 2015

La energía requerida para accionar las válvulas del sistema de control automático es de 50 KW aproximadamente. Por consiguiente por año se consume:

$$50 \frac{KJ}{s} * \frac{3600 * 24 * 340 s}{año} * \frac{1GJ}{10^6 KJ} = 1468.8 \frac{GJ}{año}$$

Como se observa en la Figura 12, los químicos que se generan en el proceso de lavado, son conducidos a un proceso de recuperación de químicos al que se le tuvo que realizar el balance de masa y energía como se muestra en la Figura 14 y en las tablas 41 a 45.





**Figura 14. Diagrama de procesos de recuperación de químicos**  
 Fuente: Elaboración propia, 2015



**Tabla 41:**  
**Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro: Evaporadores**

| Proceso Unitario:       | Recuperación de químicos del licor negro: Evaporadores   |
|-------------------------|--|
| Descripción:            | El licor negro se ingresa a evaporadores en donde se evapora hasta disminuir su humedad al 40 %, luego se pulveriza en la caldera de recuperación. La parte orgánica se consume como combustible, generando calor que se recupera en la parte superior del horno en forma de vapor a elevada temperatura. La parte inorgánica no quemada se recoge en el fondo de la caldera como una mezcla fundida. El fundido fluye fuera del horno y se disuelve en agua, obteniéndose un licor que contiene principalmente NaOH.  |
| Equipos                 | Evaporadores   |
| Entradas                | <i>Licor negro = 3659.25 KTon</i><br><i>Total entradas = 3659.25 = 3659.25 KTon</i>  |
| Salidas                 | <i>El Licor negro se concentra hasta el 24% de su peso inicial</i><br><i>-Licor negro concentrado = 3659.25*0.24 = 880.14 KTon</i><br><i>-Vapor de agua y compuestos volátiles = 3659.25 - 880.14 = 2779.11 KTon</i><br><i>Total salidas = 880.14 + 2779.11 = 3659.25 KTon</i>   |
| Condiciones del proceso | pH de entrada = 11<br>PH de salida = 12.3<br>Temperatura = Menor de 120°C<br>DQO del licor negro = 7000 mg/l<br>Sólidos totales = 70000 mg/l   |
| Energía                 | <p><i>Se requiere una chaqueta de vapor saturado a 200°C que se enfría hasta líquido saturado a la misma temperatura, para evaporar parte del agua del licor negro a temperatura constante de 120°C desde líquido saturado hasta vapor saturado.</i></p> <p><i>hg = Entalpía del vapor saturado a 120°C = 2706 GJ/KTon (Yunus, 2009)</i><br/> <i>hf = Entalpía del líquido saturado a 120°C = 507 GJ/KTon (Yunus, 2009)</i><br/> <i>Entalpía del vapor saturado a 200°C = 2793 GJ/KTon</i><br/> <i>Entalpía del líquido saturado a 200°C = 898 GJ/KTon</i></p> $\text{Calor requerido} = \text{Masa a evaporar} * (h_g - h_f)$ $\text{Calor requerido} = 2779.11 \text{ KTon} * (2706 - 507) \frac{\text{GJ}}{\text{KTon}} = 6'111263 \text{ GJ}$ <p><i>Vapor requerido:</i></p> $\text{Masa de Vapor requerido} = \frac{\text{Calor requerido}}{h_{\text{vapor a 200°C}} - h_{\text{líquido a 200°C}}} = \frac{6'111263 \text{ GJ}}{(2793 - 898) \frac{\text{GJ}}{\text{KTon}}} =$ <p>1895 KTon</p> |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 42:**  
**Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro:**  
**Caldera de recuperación**

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Caldera de recuperación   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Caldera   |
| Entradas          | -Licor negro concentrado = 880.14 KTon<br>Se usan 2.4 partes de aire por cada parte de licor negro concentrado (Red Sauce, 2010)<br>-Aire = 2115.88 KTon<br>Total entradas: $880.14 + 2115.88 = 2996.02$ KTon |
| Salidas           | El 20% del licor negro concentrado sale de la caldera como material fundido<br>-Fundidos = $0.2 * 880.14 = 179.84$ KTon<br>Emisiones = Total entradas - Fundidos = $2996.02 - 179.84 = 2816.18$ KTon          |
| Energía           | Se obtiene vapor de la energía liberada por la quema del licor negro<br>Se obtiene 1 parte de vapor por cada 2 partes de licor negro concentrado:<br>Vapor obtenido = $880.14 / 2 = 440.07$ KTon              |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 43:**  
**Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro:**  
**Reactor (Tanque de dilución)**

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Reactor (Tanque de dilución)   |
|-------------------|--|
| Equipos           | Reactor (Tanque de dilución)   |
| Entradas          | -Fundidos = $0.2 * 880.14 = 179.84$ KTon<br>Cal: Se usa el 5% de cal respecto a la masa de fundidos que ingresan al reactor:<br>-Cal = $0.05 * 179.84$ KTon = 9.15 KTon<br>Agua: Por cada parte de fundidos, se dosifica el 17% de agua en el reactor<br>-Agua = $0.17 * 179.84 = 30.539$ KTon<br>Del proceso del horno que se encuentra en la tabla 26, se recircula al reactor<br>85.85 KTon de cal<br>- Cal recirculada = 85.85 KTon de cal<br>Total entradas = $179.84 + 9.15 + 30.539 + 85.85 = 305.379$ KTon |
| Salidas           | -Mezcla del reactor = 305.379 KTon   |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 44:**  
**Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro:**  
**Clarificador**

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Clarificador                        |
|-------------------|---|
| Equipos           | Clarificador (Decantador)   |
| Entradas          | -Mezcla del reactor = 305.379 KTon  |
| Salidas           | En el decantador se separa en la parte superior una solución de NaOH al 16.5% |

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Clarificador   |
|-------------------|--|
|                   | <p>en peso y un precipitado de <math>CaCO_3</math></p> <p>Solución de NaOH:</p> <p>Por cada KTon de licor negro, se pulverizan 50 Kg de químicos</p> <p>Químicos pulverizados = <math>\frac{50 \text{ Kg Químicos Pulv}}{1 \text{ KTon Licor negro}} * 3659.25 \text{ KTon Licor negro} = 182962.5 \text{ Kg} * \frac{1 \text{ KTon}}{10^6 \text{ Kg}} = 0.18 \text{ KTon de Químicos Pulv}</math></p> <p>Químicos pulverizados = 0.18 KTon (NaOH seco)</p> <p>Agua en solución de soda = <math>\frac{0.18 \text{ KTon NaOH seco}}{0.835\%} * 99.165\% = 21.38 \text{ KTon}</math></p> <p>-Agua de solución de soda = 21.38 KTon</p> <p>Solución de NaOH = NaOH seco + agua de solución de soda</p> <p>-Solución de NaOH = 0.18 + 21.38 = 21.56 KTon</p> <p>Carbonato de calcio húmedo:</p> <p><math>CaCO_3</math> húmedo = Total entradas - Solución de NaOH</p> <p><math>CaCO_3</math> húmedo = 305.379 - 21.56 = 283.819 KTon</p> |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 45:**  
**Proceso unitario recuperación de químicos del licor negro:**  
**Horno**

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Horno   |
|-------------------|---|
| Equipos           | Horno   |
| Entradas          | <p>El <math>CaCO_3</math> contiene 46% de agua (Red Sauce, 2010)</p> <p><math>CaCO_3</math> húmedo = 283.819 KTon</p> <p><math>CaCO_3</math> seco = <math>0.54 * 283.819 = 153.3 \text{ KTon}</math></p> <p>Agua = <math>0.46 * 283.819 = 130.515 \text{ KTon}</math></p> <p>Total entradas = <math>153.3 + 130.515 = 283.819 \text{ KTon}</math></p>   |
| Salidas           | <p>En el horno se retira el agua y el <math>CaCO_3</math> se descompone emitiendo <math>CO_2</math> (gas) y dejando la cal <math>CaO</math> precipitada (Sólido), mediante la siguiente reacción:</p> <p>Cal:</p> <p><math>CaCO_3 \longrightarrow CO_2 (g) + CaO (s)</math></p> <p><math>CaO (Cal) = 153.3 \text{ KTon } CaCO_3 * \frac{56 \text{ KTon } CaO}{100 \text{ KTon } CaCO_3} = 85.85 \text{ KTon}</math></p> <p>- <math>CaO (Cal) = 85.85 \text{ KTon}</math></p> <p>Emisiones:</p> <p><math>CO_2 = 153.3 \text{ KTon } CaCO_3 * \frac{44 \text{ KTon } CO_2}{100 \text{ KTon } CaCO_3} = 67.55 \text{ KTon}</math></p> <p>- <math>CO_2 = 67.55 \text{ KTon}</math></p> <p>- Vapor = 130.515 KTon</p> <p>Total salidas = <math>85.85 + 67.55 + 130.515 \text{ KTon}</math></p> <p>Total salidas = 283.819 KTon</p> |
| Energía           | <p><math>CaCO_3 \longrightarrow CO_2 (g) + CaO (s)</math></p> <p>Calor de Formación:</p> <p><math>CaCO_3 = -1207 \text{ KJ/mol}</math></p>  |

| Proceso Unitario: | Recuperación de químicos del licor negro: Horno  |
|-------------------|--|
|                   | $CaO = -635.6 \text{ KJ/mol}$ $CO_2 = -393.52 \text{ KJ/mol}$ $\text{Calor de Formación} = \text{Calor de los productos} - \text{Calor de los reactivos}$ $\text{Calor de Formación} = (-393.52 - 635.6) - (-1207) = 177.88 \text{ KJ/mol}$ $\text{Calor de Formación} = 177.88 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} * \frac{\text{mol CaCO}_3}{100 \text{ gr}} * \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ Kg}} = 1778.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 1778.8 \frac{\text{GJ}}{\text{KTON}}$ $\text{Calor requerido en el horno} = 1778.8 \frac{\text{GJ}}{\text{KTON CaCO}_3} * 153.3 \text{ KTON CaCO}_3 = 272690 \text{ GJ}$ |

Fuente: Elaboración propia, 2015

## 4.2 Evaluación de Impacto

Los resultados de los impactos ambientales generados por el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar se presentan a continuación para los dos tipos de aprovechamiento analizados, cogeneración de energía y producción de papel.

Para efectos de la evaluación ambiental, se analizaron los impactos ambientales generados en los procesos unitarios de cada tipo de aprovechamiento hasta llegar al respectivo producto final. Para el caso de la cogeneración de energía, el producto final evaluado es el vapor, porque con éste se produce la energía a utilizar en la planta, el vapor para otros procesos y la energía restante para alimentar la red nacional. Para el caso de la producción de papel, el producto final es el papel.

### 4.2.1 Impactos Ambientales generados en la producción de vapor

A continuación se presenta el árbol de contribución de impactos ambientales para la producción de vapor para cada una de las categorías de impacto analizadas, como se muestra en las figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20.

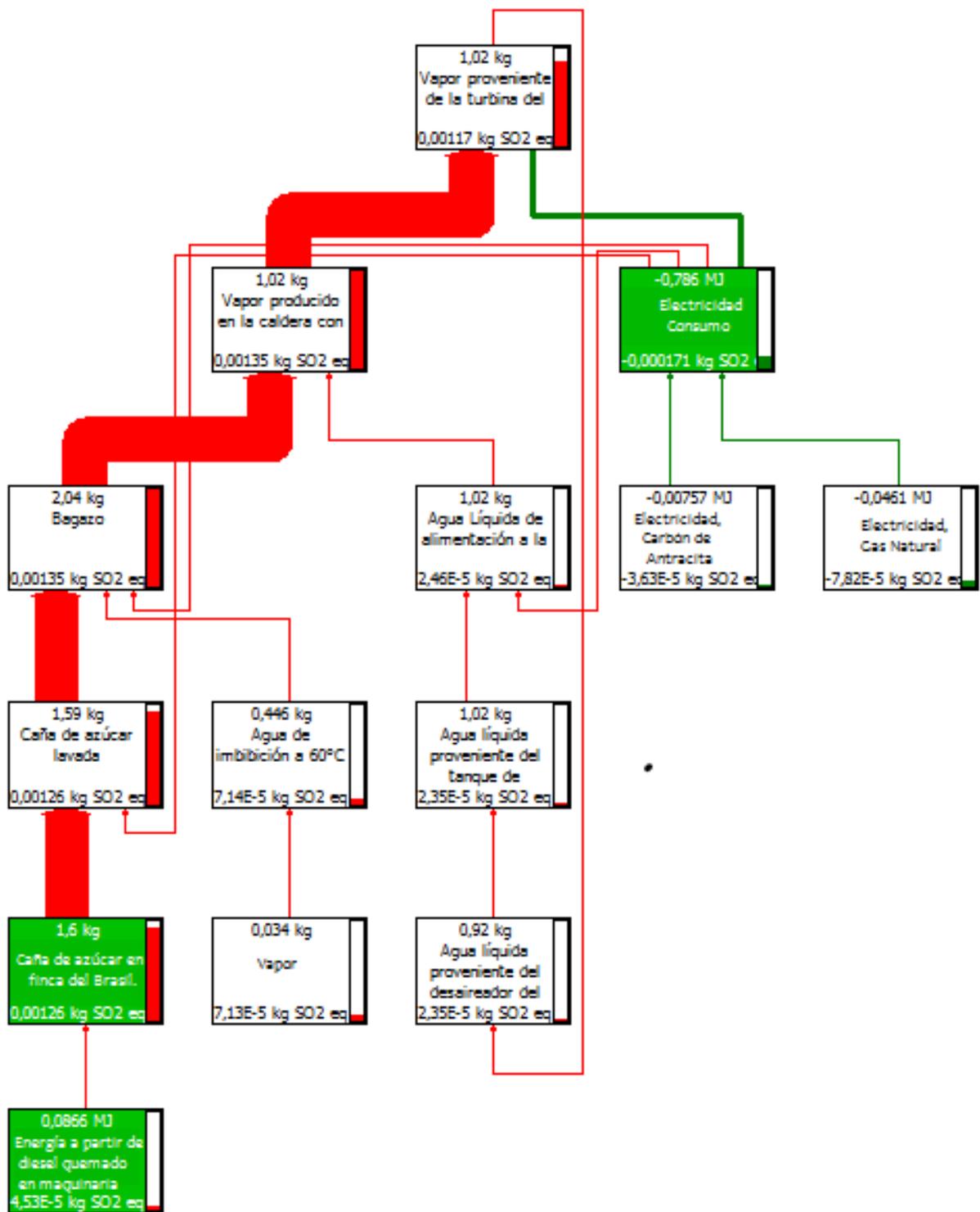


Figura 15. Árbol de contribución de impactos de la categoría Acidificación en la producción de Vapor  
Fuente: Resultado software Simapro. 2015

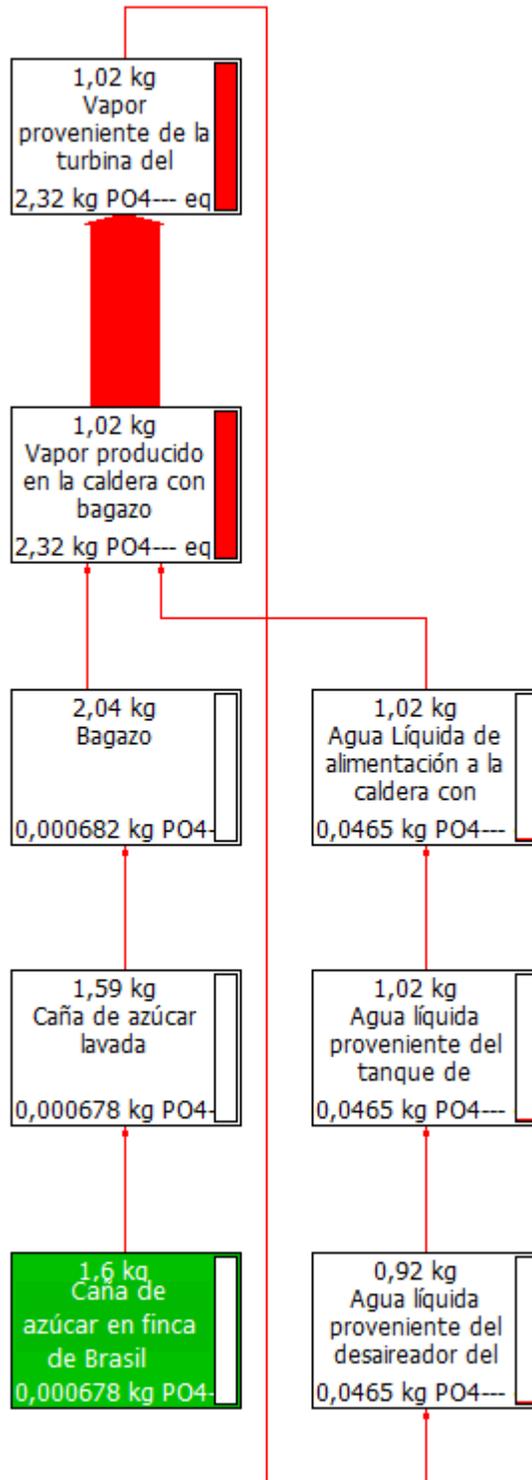


Figura 16. Árbol de contribución de impactos de la categoría Eutrofización en la producción de Vapor Fuente: Resultado software Simapro. 2015

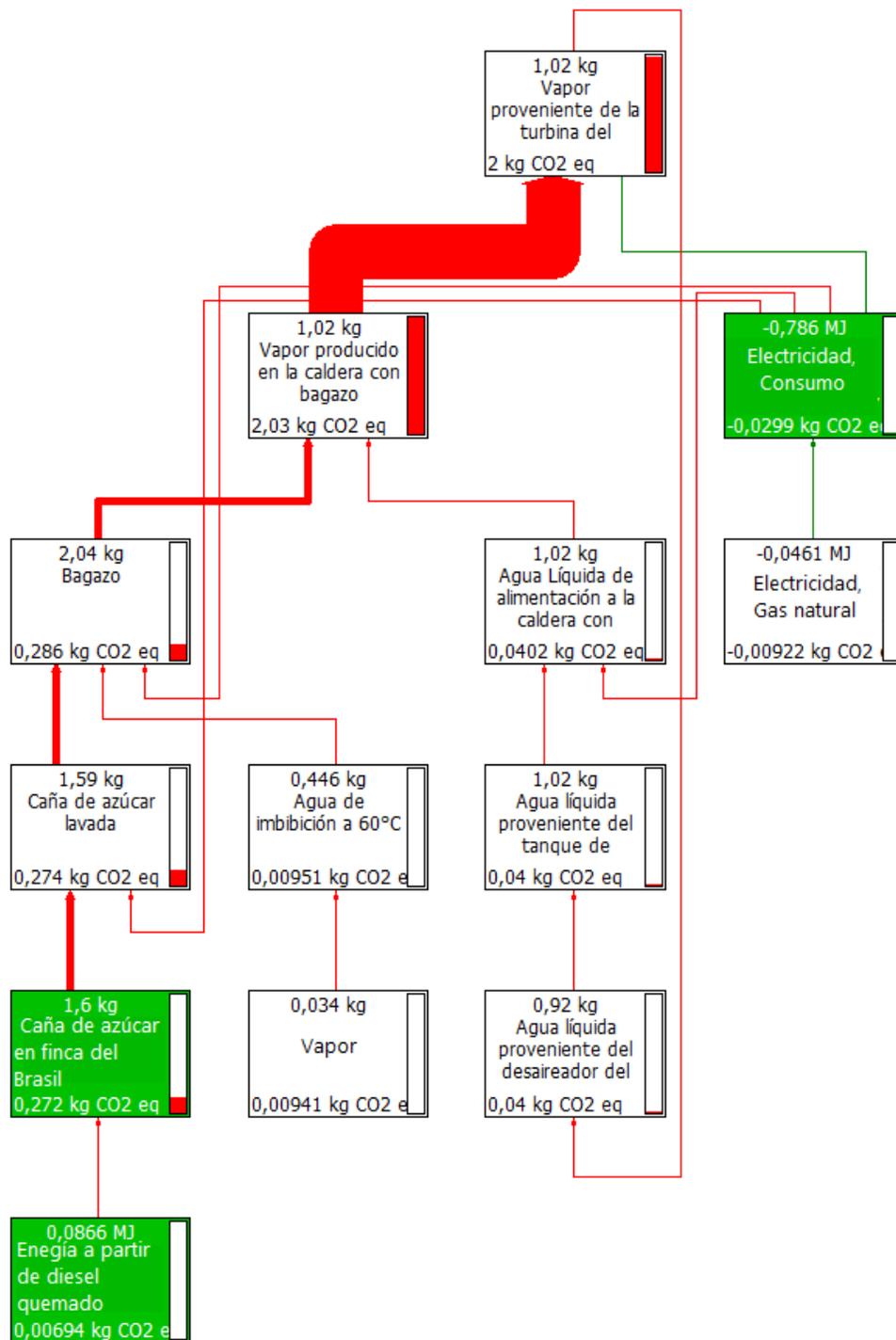
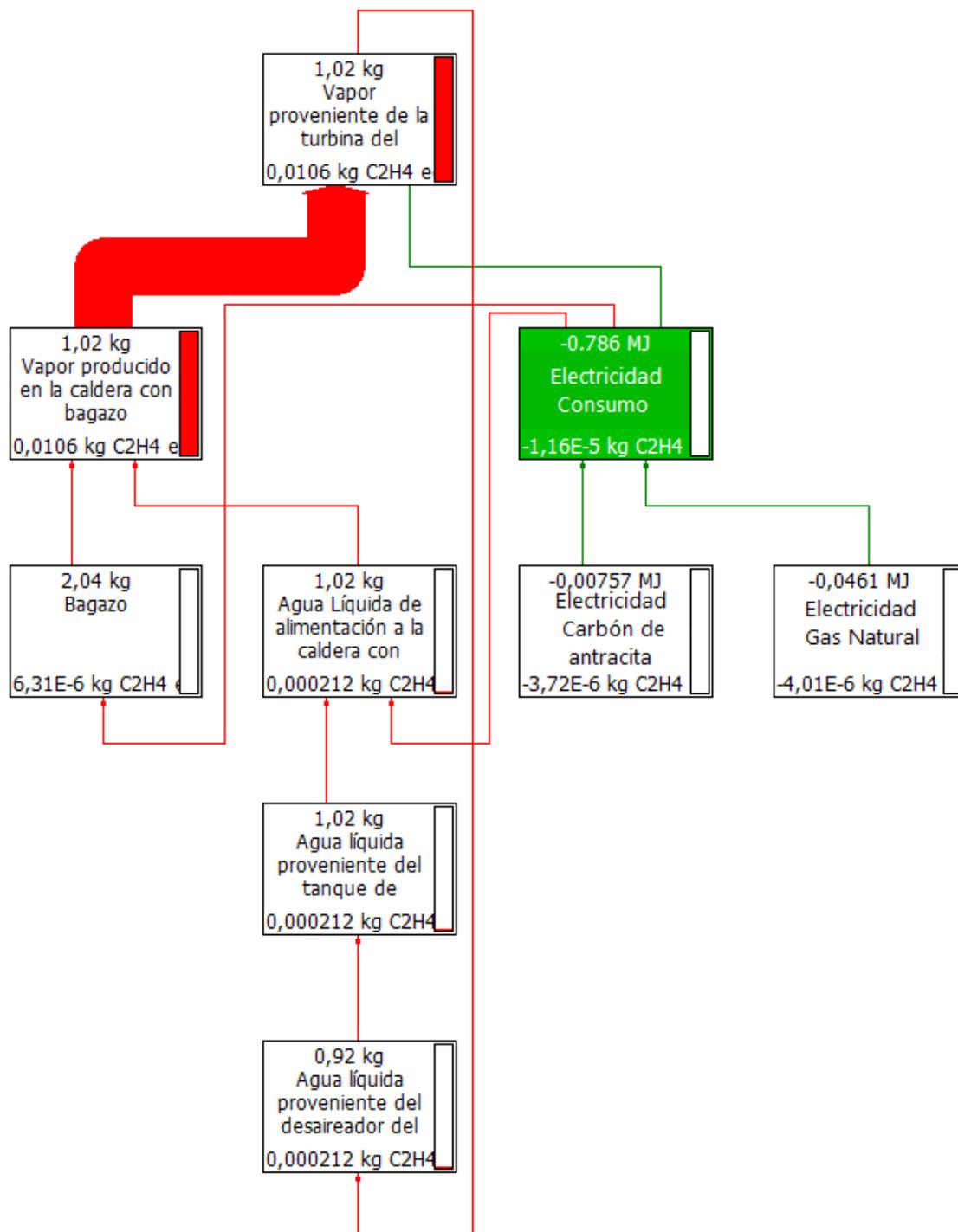


Figura 17. Árbol de contribución de impactos de la categoría Calentamiento Global en la producción de Vapor

Fuente: Resultado software Simapro. 2015



**Figura 18. Árbol de contribución de impactos de la categoría Oxidación Fotoquímica en la producción de Vapor**

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

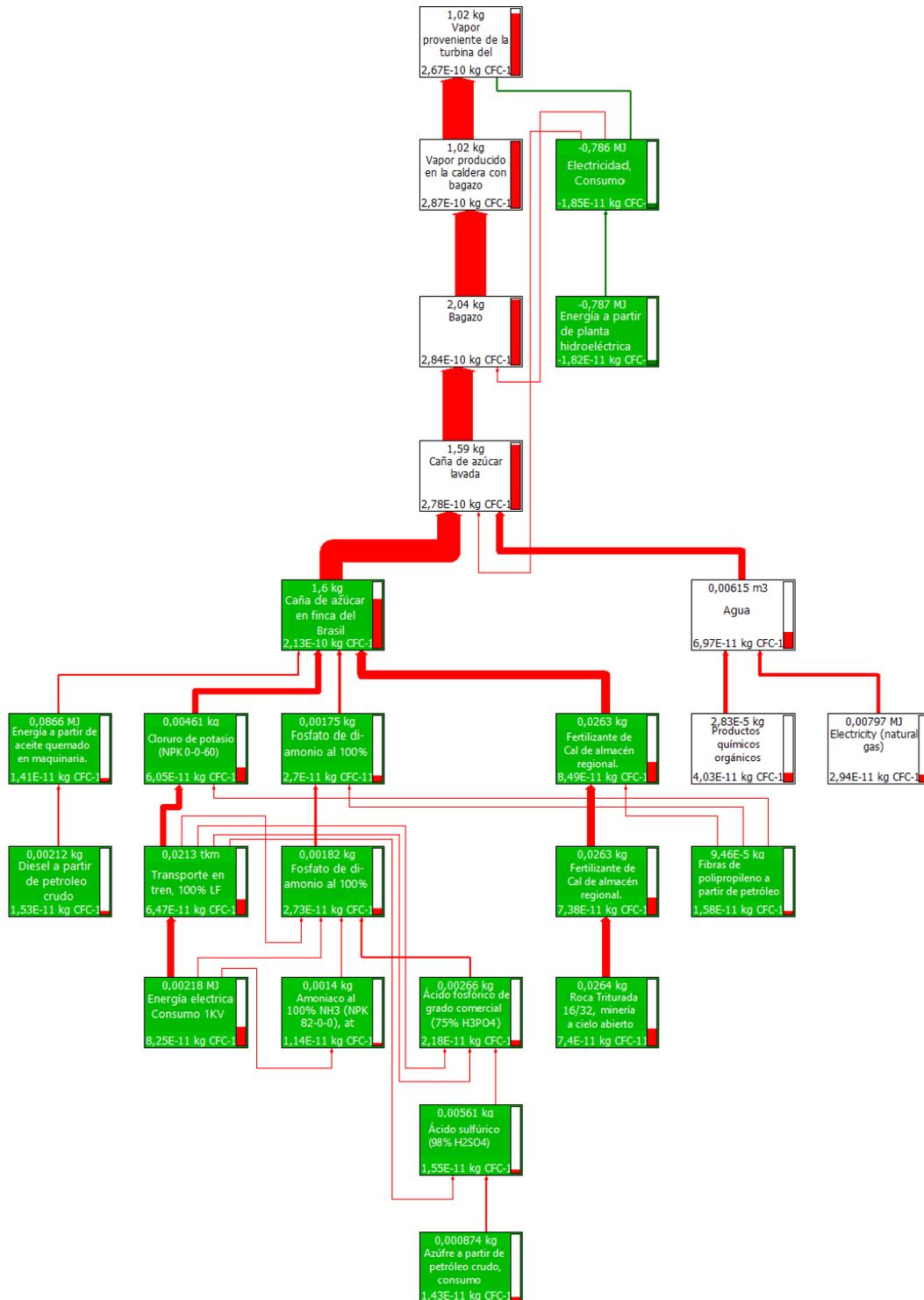


Figura 19. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro de la capa de Ozono en la producción de Vapor

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

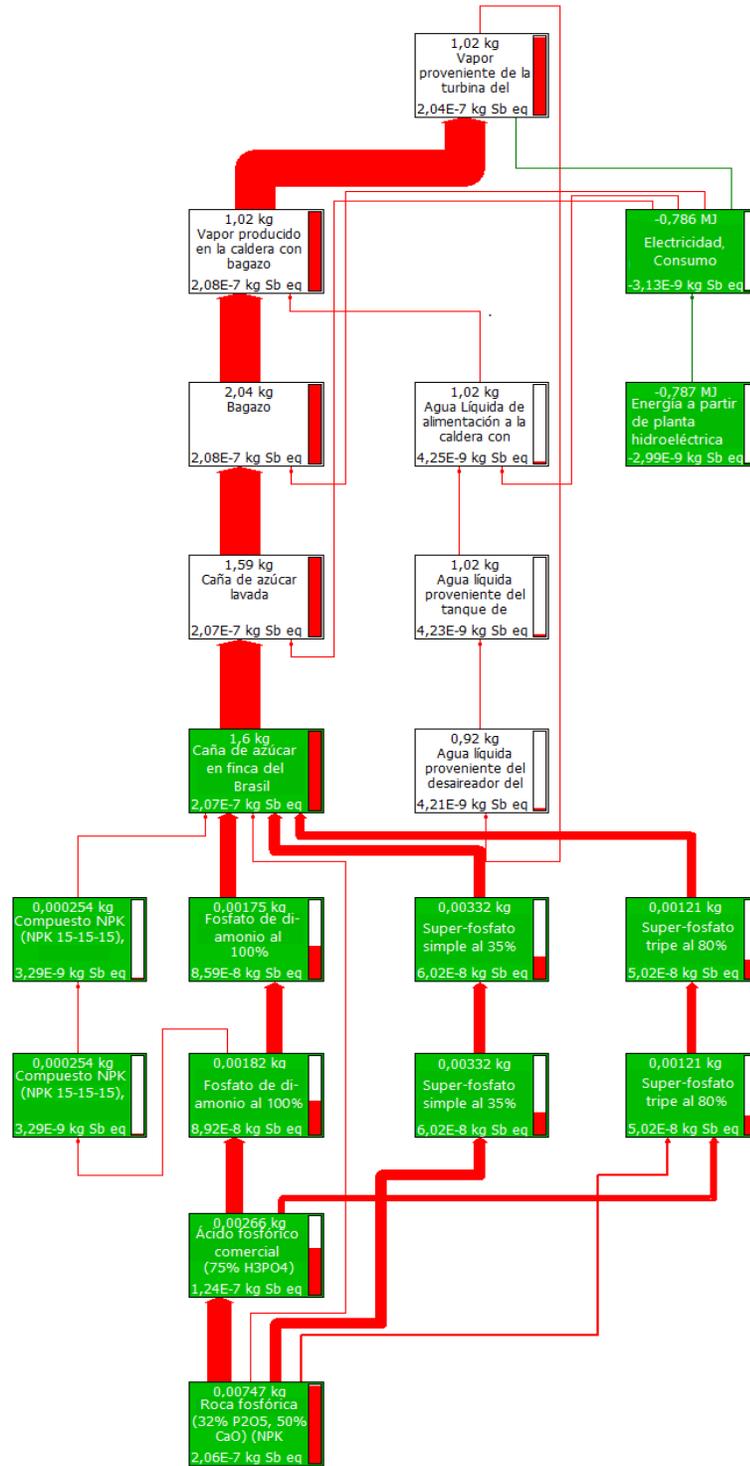
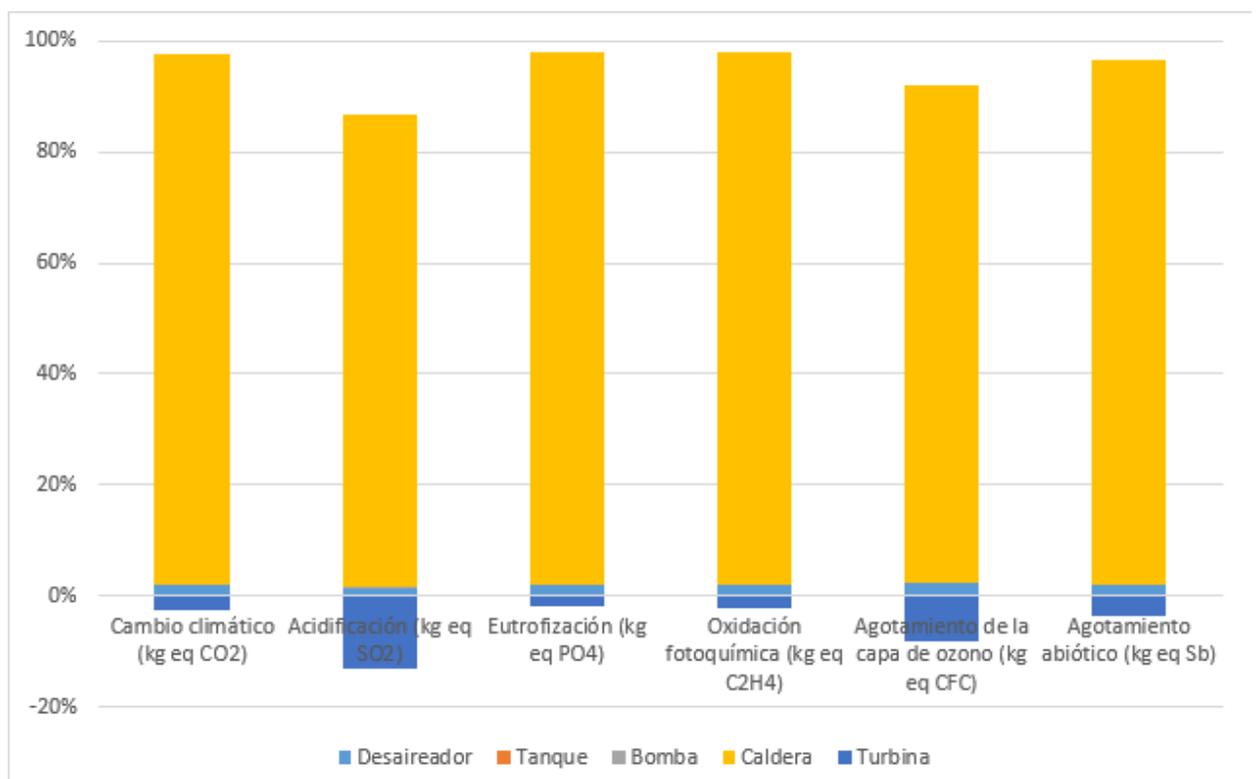


Figura 20. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro Abiótico en la producción de Vapor

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

En la Figura 21 se presenta el perfil medio ambiental para la generación de vapor, en donde se muestra el porcentaje de aporte por proceso, a cada una de las categorías de Impacto. Se construyó sumando los Kg-eq totales en cada una de las 6 categorías evaluadas y posteriormente calculando el porcentaje de aporte por cada etapa del proceso. Se evidencia aquí que en la caldera es donde se produce la mayor cantidad de impactos en las seis categorías de impacto analizadas. En segundo lugar se encuentra la turbina especialmente por sus impactos generados a la categoría de acidificación.



**Figura 21. Perfil medio ambiental proceso de generación de Vapor**  
Fuente: Resultado software Simapro. 2015

#### 4.2.2 Impactos Ambientales generados en la producción de Papel

A continuación se presenta el árbol de contribución de impactos ambientales para la producción de Papel para cada una de las categorías de impacto analizadas, como se muestra en las figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27.

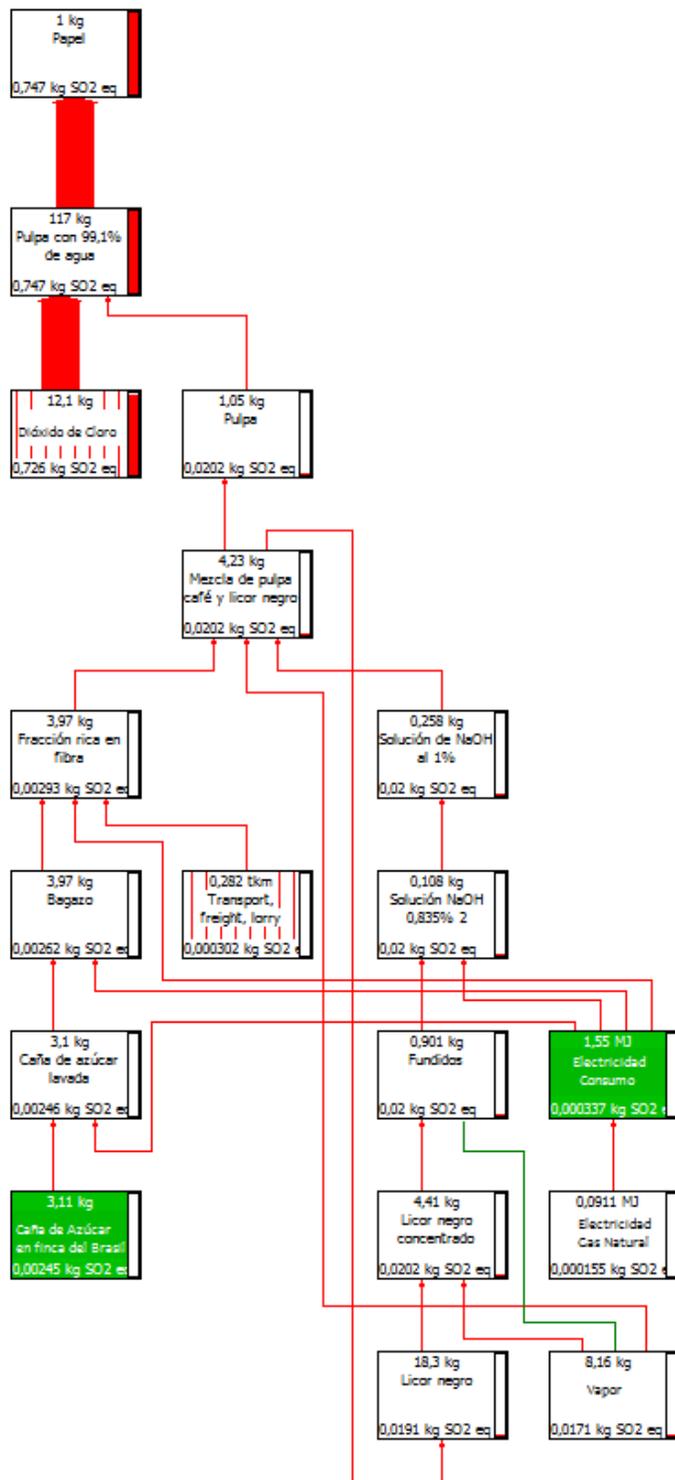


Figura 22. Árbol de contribución de impactos de la categoría Acidificación en la producción de Papel

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

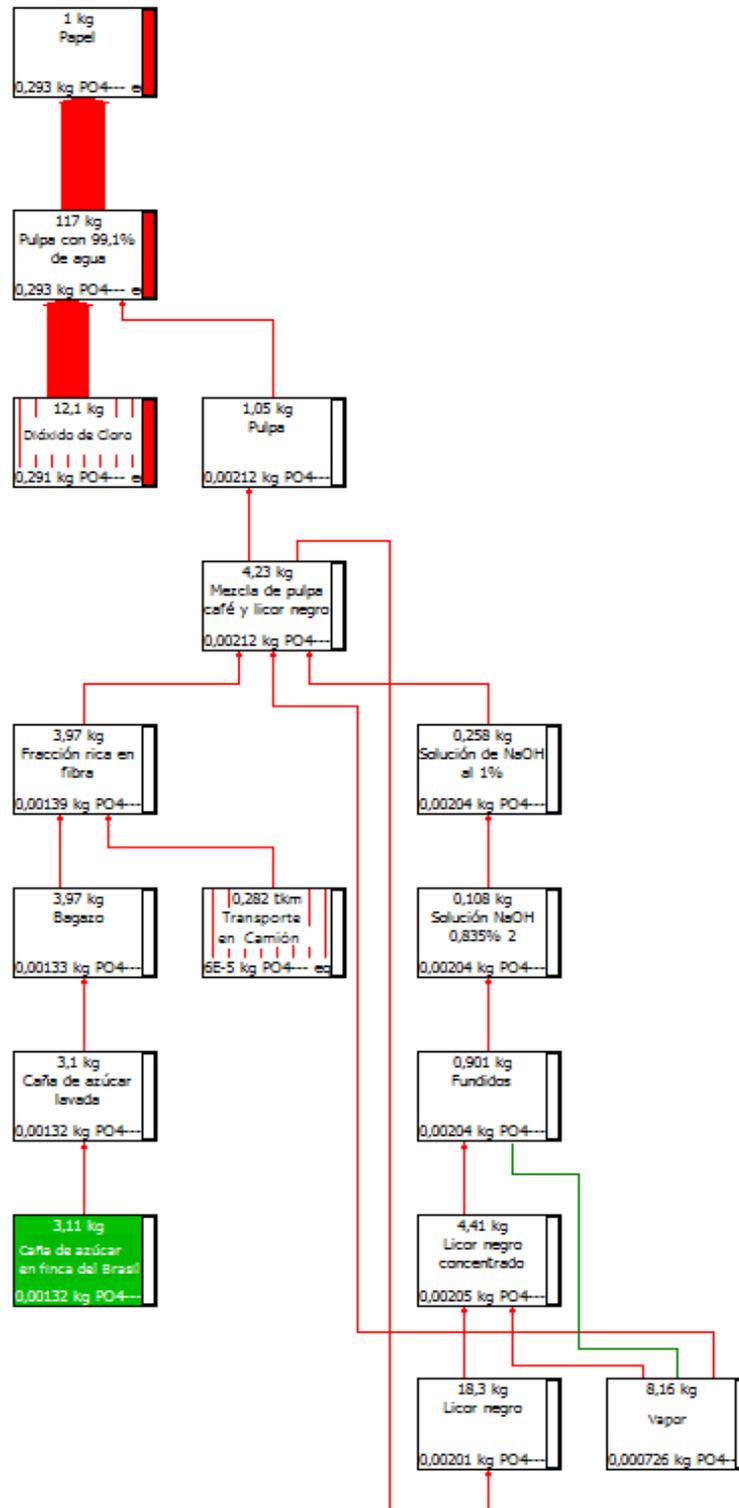


Figura 23. Árbol de contribución de impactos de la categoría Eutrofización en la producción de Papel

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

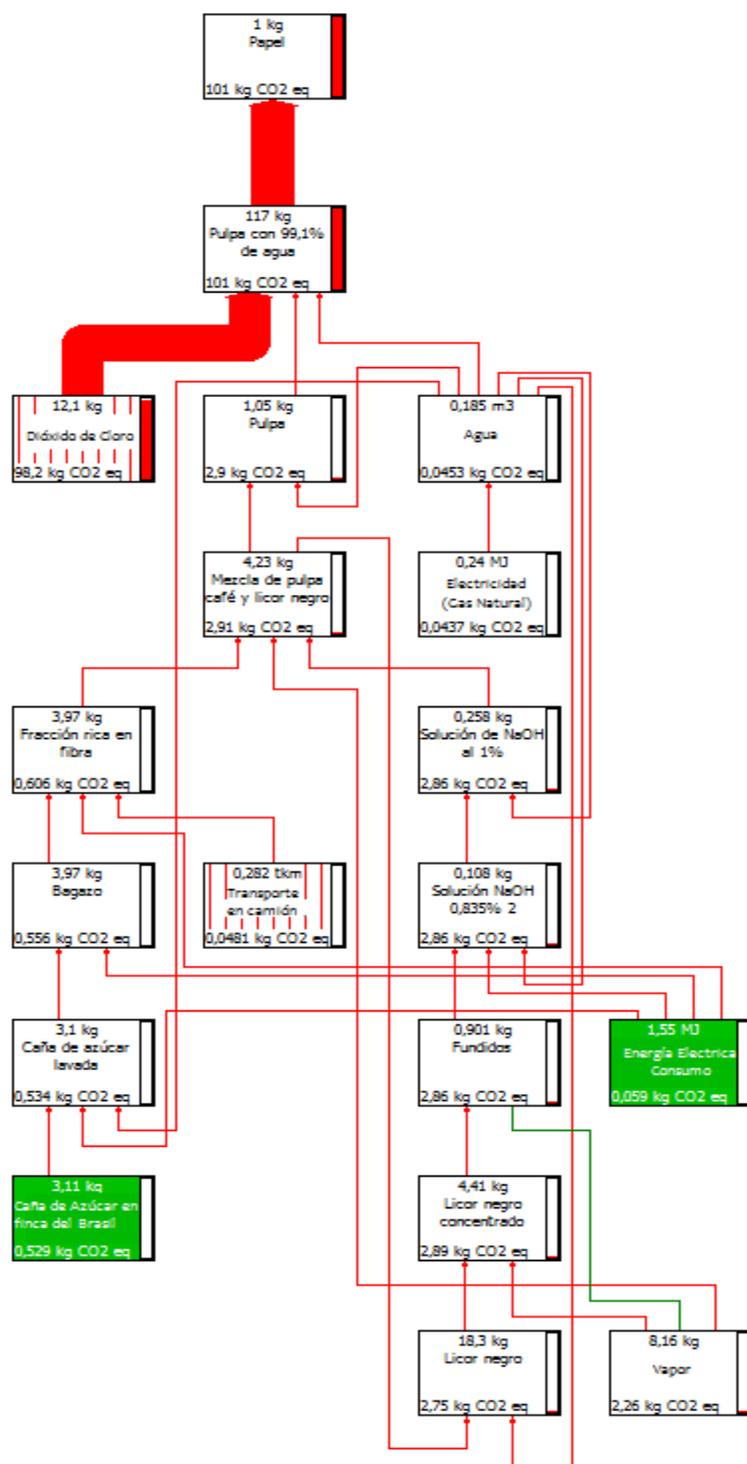
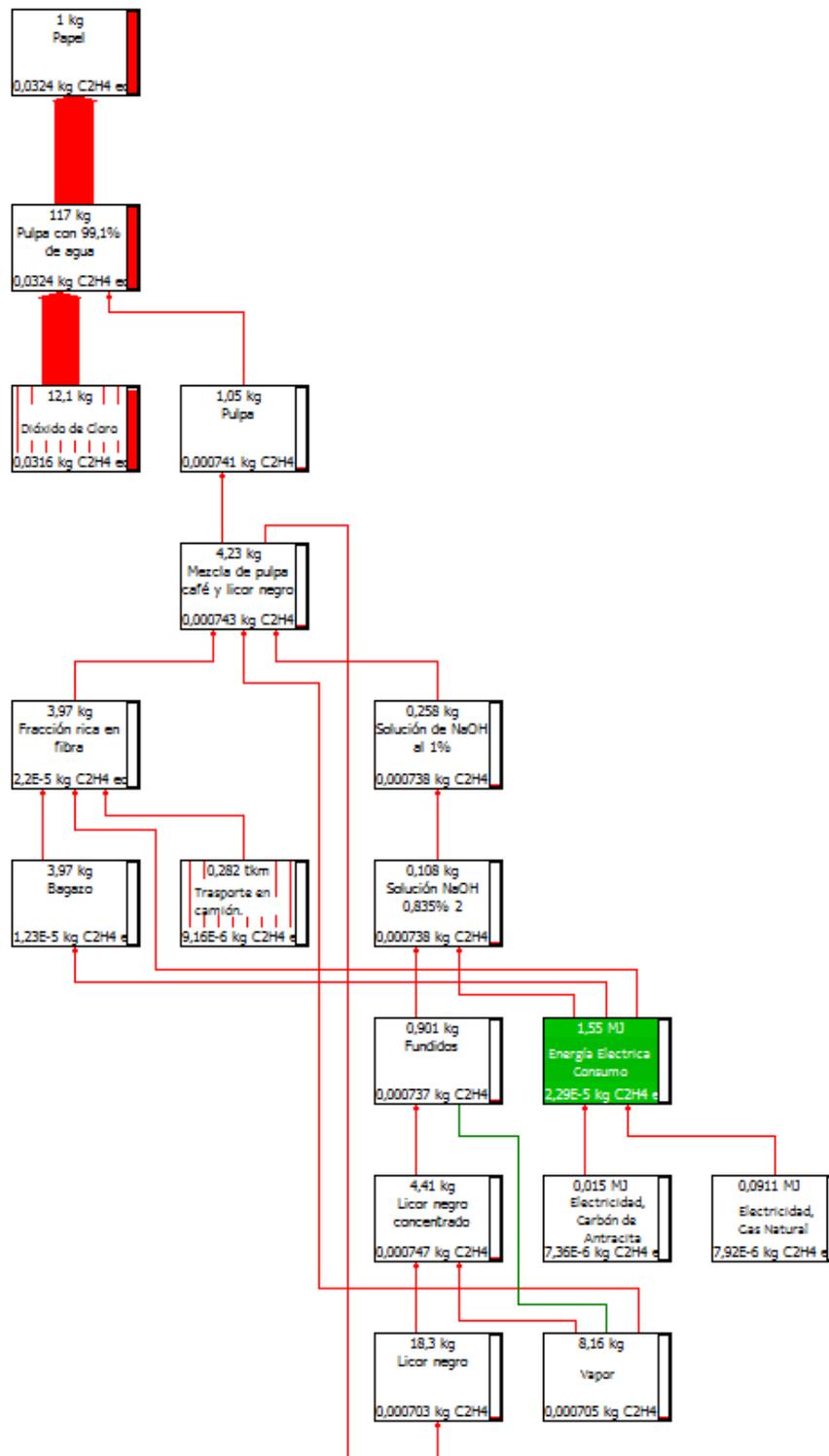


Figura 24. Árbol de contribución de impactos de la categoría Calentamiento Global en la producción de Papel

Fuente: Resultado software Simapro. 2015



**Figura 25. Árbol de contribución de impactos de la categoría Oxidación Fotoquímica en la producción de Papel**

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

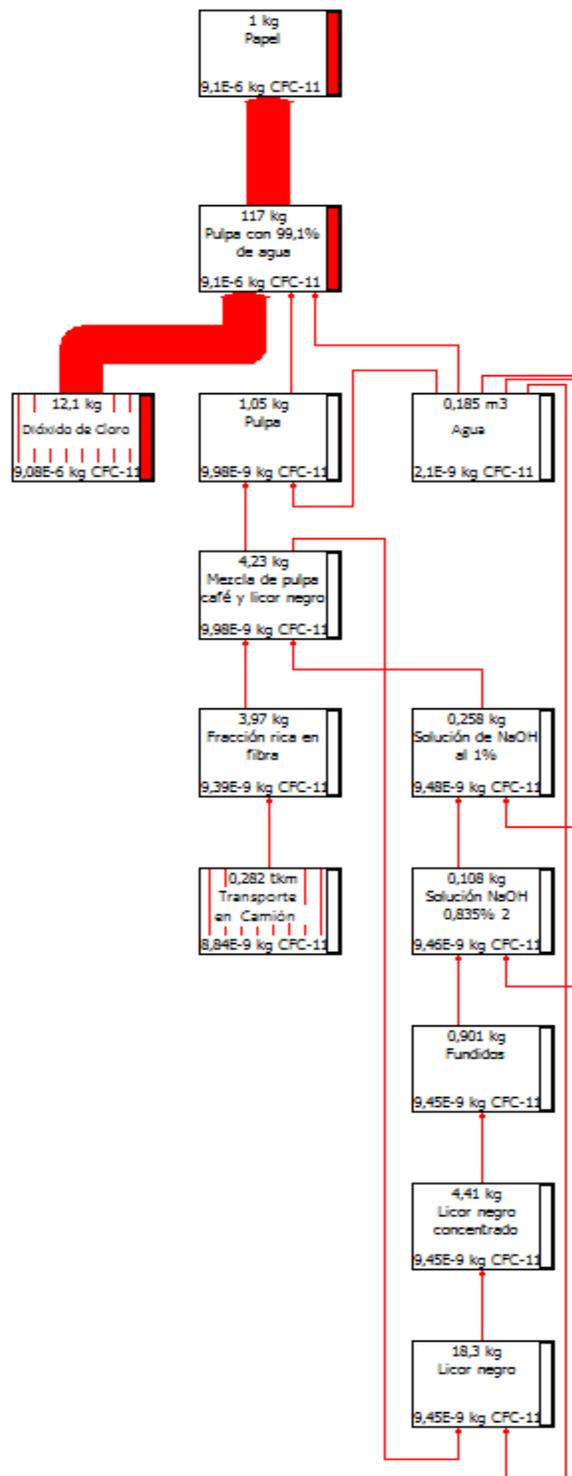


Figura 26. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro de la capa de Ozono en la producción de Papel

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

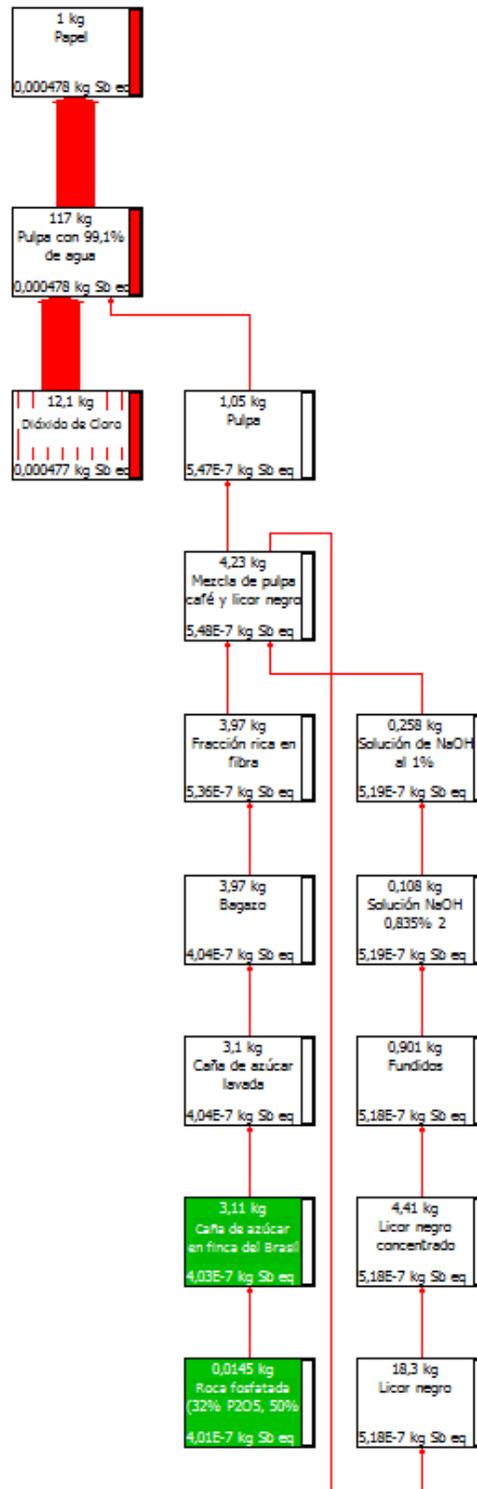
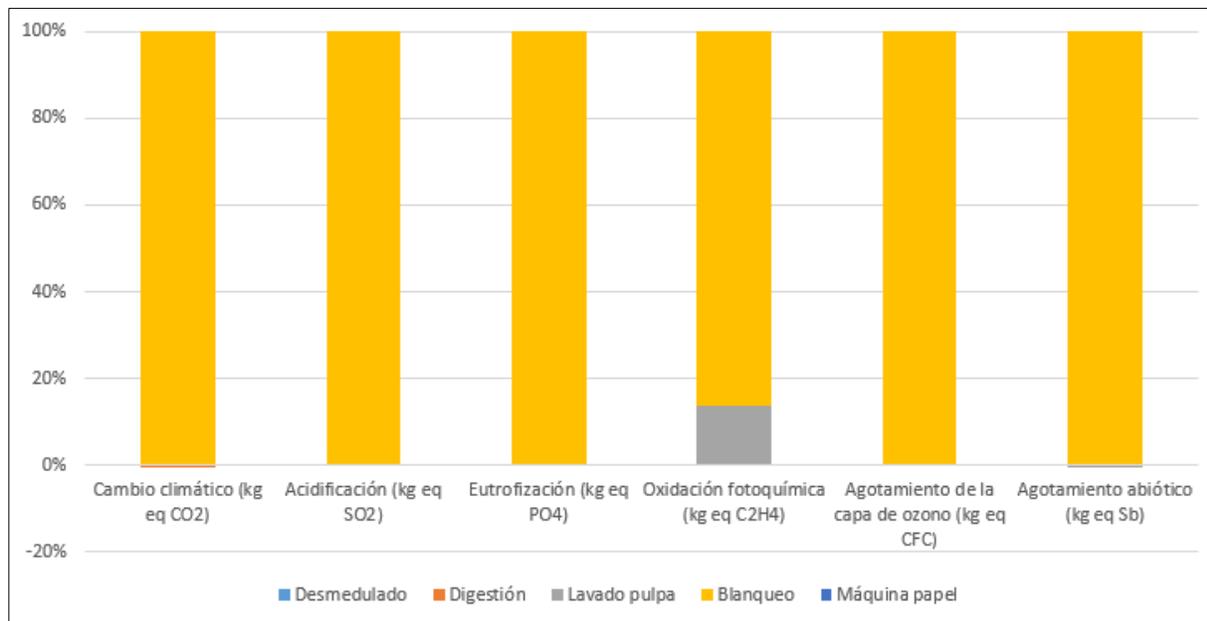


Figura 27. Árbol de contribución de impactos de la categoría Deterioro Abiótico en la producción de Papel

Fuente: Resultado software Simapro. 2015

En la Figura 28 se presenta el perfil medio ambiental para la producción de papel, en donde se muestra el porcentaje de aporte por proceso, a cada una de las categorías de Impacto. Se construyó sumando los Kg-eq totales en cada una de las 6 categorías evaluadas y posteriormente calculando el porcentaje de aporte por cada etapa del proceso.



**Figura 28. Perfil medio ambiental proceso de producción de papel**

Fuente: Autora

Como se observa en la Figura 28, el proceso unitario de blanqueo es el que más genera impactos ambientales en todas las categorías, seguido por el lavado de la pulpa que genera impactos únicamente en la categoría de oxidación fotoquímica.

### 4.3 Análisis de Resultados del ACV

A continuación se presenta el análisis de datos arrojados por el software SIMAPRO para los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

### **4.3.1 Análisis de Resultados para el aprovechamiento del bagazo para la producción de vapor**

Los árboles de contribución de impactos para cada categoría de impacto analizada, muestran que el proceso unitario que genera mayores impactos ambientales es la producción de vapor en la Caldera, seguida del vapor producido en la turbina y luego por el desaireador lo que se evidencia en el perfil ambiental para la producción de vapor (Figura 21).

Para la categoría de Impacto acidificación, por cada kg de vapor producido se generan del proceso 0.00117 Kg de SO<sub>2</sub>-eq, en donde su aporte más significativo es de la caldera por la emisión de óxidos de azufre, pero además se observa en el árbol que el transporte de la caña de azúcar a los ingenios tiene un aporte significativo debido a las emisiones de óxidos de azufre que generan los vehículos.

En la categoría de Impacto Eutrofización, por cada kg de vapor producido se generan del proceso 2.32 Kg de PO<sub>4</sub>-eq y su aporte casi total se hace desde el proceso unitario de la producción de vapor en la caldera.

En la categoría de Impacto Calentamiento Global, por cada kg de vapor producido se generan del proceso 2 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, se evidencia que existe un leve impacto en la entrada de la caña al sistema debido al aporte de las emisiones de combustibles fósiles en el transporte.

En la categoría de Impacto Oxidación Fotoquímica, por cada kg de vapor producido generan del proceso 0.0106 Kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq y es generado en su totalidad en la caldera.

En la categoría de Impacto Deterioro de la capa de Ozono, por cada kg de vapor producido se generan del proceso 2.67e<sup>-10</sup>Kg de CFC-eq. El impacto de esta categoría se evidencia en la aplicación de los fertilizantes usados en los cultivos de la caña y en los químicos utilizados para tratar el agua de lavado de la caña.

En la categoría de Impacto Deterioro abiótico, por cada kg de vapor producido se generan del proceso  $2.04e^{-7}$  Kg de Sb-eq. Los impactos en esta categoría se evidencian desde la etapa de cultivo de la caña en donde existe disminución de Nitrógeno y Fósforo del suelo, el uso de fertilizantes y el uso del recurso hídrico para el lavado de la caña.

Teniendo en cuenta que hasta hace pocos años se utilizaba como combustible de las calderas el carbón, se hizo una comparación de los resultados obtenidos en este ACV 1kg de vapor generado con combustible carbón de la base de datos de SIMAPRO como se muestran en la tabla 46.

**Tabla 46:**  
**Comparación de los impactos generados con bagazo carbón para la generación de 1 Kg de Vapor**

| Categoría de Impacto          | Unidades                             | Combustible Carbón SIMAPRO | Combustible Bagazo de caña de azúcar |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Acidificación                 | Kg SO <sub>2</sub> -eq               | 0.0021                     | 0.00117                              |
| Eutrofización                 | Kg PO <sub>4</sub> -eq               | 8.9 e-5                    | 2.32                                 |
| Calentamiento global          | Kg CO <sub>2</sub> -eq               | 0.277                      | 2                                    |
| Oxidación Fotoquímica         | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq | 8.64 e-5                   | 0.0106                               |
| Deterioro de la capa de Ozono | Kg CFC-eq                            | 0                          | $2.67e^{-10}$                        |
| Deterioro Abiótico            | Kg Sb-eq                             | $5.13e^{-10}$              | $2.04e^{-7}$                         |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Como se puede observar, el aporte en la categoría de acidificación del bagazo es menor que el del carbón, debido a que las emisiones de óxidos de azufre son menores. Sin embargo, en las otras categorías el bagazo como combustible genera mayores impactos y se considera que se debe a los tipos de calderas utilizadas y al alto grado de combustiones incompletas que se presentan con el bagazo de caña de azúcar.

### 4.3.2 Análisis de Resultados para el aprovechamiento del bagazo para la producción de papel

Los árboles de contribución de impactos para cada categoría de impacto analizada, muestran que el proceso unitario que genera mayores impactos ambientales es el blanqueo de la pulpa, seguido por el lavado de la pulpa, lo que se evidencia con el perfil ambiental para la producción de papel.

Para poder hacer un análisis del comportamiento de las categorías de impacto en el proceso de producción de papel con bagazo de caña de azúcar, se realizó un paralelo con dos tipos de papel que se encuentran en la base de datos de SIMAPRO como se muestra en la Tabla 47.

**Tabla 47:**  
**Comparación de los impactos generados con bagazo carbón para la generación de 1 Kg de Papel**

| Categoría de Impacto          | Unidades                             | Papel Kraft Blanqueado SIMAPRO | Papel Kraft no blanqueado SIMAPRO | Papel Bagazo de caña de azúcar |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Acidificación                 | Kg SO <sub>2</sub> -eq               | 0.0115                         | 0.0094                            | 0.747                          |
| Eutrofización                 | Kg PO <sub>4</sub> -eq               | 0.00504                        | 0.0052                            | 0.293                          |
| Calentamiento global          | Kg CO <sub>2</sub> -eq               | 1.69                           | 1.25                              | 101                            |
| Oxidación Fotoquímica         | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq | 0.000504                       | 0.000445                          | 0.0324                         |
| Deterioro de la capa de Ozono | Kg CFC-eq                            | 1.8e-7                         | 1.4e-7                            | 9.1 e-6                        |
| Deterioro Abiótico            | Kg Sb-eq                             | 2.81 e-6                       | 8.42e-6                           | 0.000478                       |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Se puede evidenciar que para todas las categorías de impacto, contrario a lo que la teóricamente se afirma, el impacto ambiental del papel producido con bagazo de caña de azúcar supera a los otros dos tipos de papel. Puede presentarse esto por la cantidad de dióxido de cloro utilizado en el blanqueo de la pulpa. Así sea considerado el Pulpeo a la Soda (el utilizado en Carvajal Pulpa y Papel) como el de menor impacto ambiental se demuestra aquí que para estas categorías de impacto el Pulpeo al Sulfato (de los papeles de la base de datos) genera menores impactos ambientales.



## **5. INCLUSIÓN DE LAS DIMENSIONES ECONÓMICA Y SOCIAL AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

Partiendo de los balances de materia y energía y de la evaluación de impactos ambientales obtenidos en el Análisis del Ciclo de vida se desarrolló la metodología para el análisis de costos del ciclo de vida LCC, para desde ahí analizar la dimensión económica de la sustentabilidad del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. De la misma manera, para analizar la dimensión social de la sustentabilidad, se hizo un análisis de los stakeholders. Finalmente, se integraron las tres dimensiones de la sustentabilidad mediante la metodología de proceso analítico jerárquico APH. A continuación se presentan los resultados obtenidos en dichas metodologías

### **5.1 Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC**

El LCC se realizó para los dos tipos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como se muestra a continuación.

#### **5.1.1 Perfil Operativo y Factor de Utilización**

Teniendo en cuenta que tanto los ingenios como Carvajal Pulpa y Papel trabajan de manera continua y que para los cálculos del ACV se tuvo en cuenta un tiempo de trabajo de 340 días al año, se va a considerar que el perfil operativo de las plantas será continuo durante el año y con esta duración. El factor de utilización de los equipos será de 1, ya que se calculará el LCC para 10 años de funcionamiento de estos, por lo que estos funcionarán de manera continua durante este tiempo.

### 5.1.2 Descripción de los elementos de costo

A continuación se describen los elementos de costo que se tuvieron en cuenta para el cálculo del LCC.

- **Costos de adquisición inicial:** Los costos de adquisición de los equipos se tomaron para la totalidad de las plantas como se muestra en la tabla 48.

**Tabla 48:**  
**Costos de adquisición**

| Tipo de Aprovechamiento | Valor (COP)          | Observaciones   |
|-------------------------|----------------------|---|
| Producción de Vapor     | 1.152.000.000.000,00 | El equipo de cogeneración para cada ingenio tiene un costo de 30.000.000 de dólares aproximadamente (Batres Lehnhoff, 2008). Se multiplicó este valor por los 12 Ingenios que en la actualidad cogeneran y se tomó el valor del dólar a 3200 pesos. |
| Producción de Papel     | 7.719.138.560,00     | (Embassy of The Federal Democratic Republic of Ethiopia in London, 2015)  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

- **Costos operacionales:** En la tabla 49. Se describen las materias primas que se utilizan en los procesos de aprovechamiento del bagazo.

**Tabla 49:**  
**Descripción de las materias primas**

| Materia Prima    | Observaciones   | Unidad | Costos (COP) |
|------------------|---|--------|--------------|
| Bagazo           | Teniendo en cuenta que el bagazo se genera en los ingenios durante el proceso de la molienda, su costo está relacionado con el de la caña de azúcar. El ingenio compra in situ la caña a los productores y la transporta hasta sus instalaciones en donde la lava y la muele produciendo el bagazo. (Bolaños, 2015) | Ton    | 30000        |
| NaOH             | Soda Caustica Liquida 48.5% x Kilo. Se utiliza en el digestor del proceso de papel  | Kg     | 4850         |
| Cal              | Se utiliza en el proceso de recuperación de químicos para la producción de papel  | Kg     | 540          |
| Dióxido de Cloro | Se utiliza en el proceso de blanqueo de la pulpa  | Kg     | 9600         |

Fuente: Elaboración propia, 2015

En la Tabla 50. Se describen los servicios industriales que se utilizan en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar

**Tabla 50:**  
**Descripción de los servicios industriales**

| <b>Materia Prima</b>            | <b>Observaciones</b>   | <b>Unidad</b>  | <b>Costos (Pesos)</b> |
|---------------------------------|--|----------------|-----------------------|
| Agua suavizada                  | Es el agua que se utiliza en las calderas; para evitar incrustaciones se retiran los metales pesados por medios de resinas de intercambio iónico. Se usa resina mixta que retiene aniones y cationes. La resina se regenera con NaCl (Cloruro de sodio) para reponer el sodio y con NH <sub>4</sub> OH (hidróxido de amonio) para regenerar los aniones. | m <sup>3</sup> | 130                   |
| Agua tratada                    | El agua tratada se utiliza para la elaboración de papel en los procesos de Preparación y lavado de la caña, Agua de imbibición para extraer el jugo de la caña en el último molino, Lavado y blanqueo de la pulpa  | m <sup>3</sup> | 97                    |
| Energía Eléctrica               | Energía requerida para la bomba en los procesos de cogeneración, trituradora, molinos, desmedulado, máquina para hacer papel y horno de recuperación de químicos y energía entregada a la red eléctrica nacional.  | KWh            | 263                   |
| Vapor                           | Vapor generado por las calderas y requerido en las turbinas, en el proceso de digestión con soda cáustica, en la recuperación de químicos y en el calentamiento del agua de imbibición para la molienda. Por cada KTon de vapor se necesitan 2 KTon de bagazo, el tratamiento del agua a evaporar y la energía eléctrica de la bomba                     | Kg             | 190                   |
| Tratamiento de aguas residuales | Tratamientos tradicionales: Primario y secundario  | m <sup>3</sup> | 70                    |

Fuente: Elaboración propia, 2015

- Los costos de transporte fueron calculados para el proceso de producción de papel teniendo en cuenta que los vehículos que transportan el bagazo tienen una capacidad de 30 ton y que realizan 3 viajes al día, por lo que cada carro puede transportar 90 Ton/ día. El costo por día de un vehículo de estas características tiene un valor de 753800 pesos. Por lo anterior, el valor anual de transporte es de 768.908.868 pesos.

- La mano de obra se calculó teniendo en cuenta que el salario promedio para los dos procesos de aprovechamiento es de 2.5 SMLV. Se tomaron 1500 empleados para Carvajal Pulpa y Papel y 600 para cada ingenio azucarero. Se tomó como factor prestacional 1.7 el valor de 1.7.
- Los costos de mantenimiento se calcularon tomando el 5% del valor inicial de las plantas de cogeneración y de producción de papel.

### **5.1.3 Cálculo del Valor Presente Neto VPN y la Tasa Interna de Retorno TIR**

Para el cálculo del VPN y la TIR para el LCC se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Se tomó el valor de la depreciación como el 10% de la inversión inicial en los 5 primeros años de los 10 estudiados.
- Las utilidades legales se calcularon restando las utilidades antes de los impuestos de la depreciación acumulada.
- Se tomó como impuesto a las utilidades el 30% de las utilidades legales.
- El impuesto al patrimonio se calculó restando del valor total de la inversión la depreciación acumulada y aplicando el 4 por mil.
- Las utilidades después de los impuestos se calcularon restando de las utilidades antes de los impuestos los impuestos a las utilidades y al patrimonio.

Inicialmente se calcularon los ingresos para cada una de las alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. En la tabla 51 se presenta el cálculo de los ingresos para la cogeneración de energía y en la tabla 52 se presenta el cálculo de los ingresos para la producción de papel.

**Tabla 51:**  
**Cálculo de los ingresos para la cogeneración de energía**

| Año  | Energía eléctrica |            | Vapor      |            | TOTAL INGRESOS       |
|------|-------------------|------------|------------|------------|----------------------|
|      | kWh               | \$/kWh     | kg         | \$/kg      |                      |
| 2015 | 610028472,2       | 263        | 2532000000 | 190        | 641.517.488.194,44   |
| 2016 | 610028472,2       | 276,15     | 2532000000 | 199,5      | 673.593.362.604,17   |
| 2017 | 610028472,2       | 289,9575   | 2532000000 | 209,475    | 707.273.030.734,38   |
| 2018 | 610028472,2       | 304,455375 | 2532000000 | 219,94875  | 742.636.682.271,09   |
| 2019 | 610028472,2       | 319,678144 | 2532000000 | 230,946188 | 779.768.516.384,65   |
| 2020 | 610028472,2       | 335,662051 | 2532000000 | 242,493497 | 818.756.942.203,88   |
| 2021 | 610028472,2       | 352,445153 | 2532000000 | 254,618172 | 859.694.789.314,08   |
| 2022 | 610028472,2       | 370,067411 | 2532000000 | 267,34908  | 902.679.528.779,78   |
| 2023 | 610028472,2       | 388,570782 | 2532000000 | 280,716534 | 947.813.505.218,77   |
| 2024 | 610028472,2       | 407,999321 | 2532000000 | 294,752361 | 995.204.180.479,71   |
| 2025 | 610028472,2       | 428,399287 | 2532000000 | 309,489979 | 1.044.964.389.503,69 |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Según la tabla 51, se partió de considerar el valor del kWh a 263 pesos COP y el valor del Vapor a 190 pesos y sobre estos precios se calcularon los siguientes años. De la misma manera se consideró para el proceso de producción de papel en la tabla 52, en donde se tomó el valor de kilogramo de papel a 1475 pesos COP.

**Tabla 52:**  
**Cálculo de los ingresos para la producción de papel**

| Año  | Energía eléctrica |            | Papel     |            | TOTAL INGRESOS     |
|------|-------------------|------------|-----------|------------|--------------------|
|      | kWh               | \$/kWh     | kg        | \$/kg      |                    |
| 2015 | 68336666,67       | 263        | 199700000 | 1475       | 312.530.043.333,33 |
| 2016 | 68336666,67       | 276,15     | 199700000 | 1548,75    | 328.156.545.500,00 |
| 2017 | 68336666,67       | 289,9575   | 199700000 | 1626,1875  | 344.564.372.775,00 |
| 2018 | 68336666,67       | 304,455375 | 199700000 | 1707,49688 | 361.792.591.413,75 |
| 2019 | 68336666,67       | 319,678144 | 199700000 | 1792,87172 | 379.882.220.984,44 |
| 2020 | 68336666,67       | 335,662051 | 199700000 | 1882,5153  | 398.876.332.033,66 |
| 2021 | 68336666,67       | 352,445153 | 199700000 | 1976,64107 | 418.820.148.635,34 |
| 2022 | 68336666,67       | 370,067411 | 199700000 | 2075,47312 | 439.761.156.067,11 |
| 2023 | 68336666,67       | 388,570782 | 199700000 | 2179,24678 | 461.749.213.870,47 |
| 2024 | 68336666,67       | 407,999321 | 199700000 | 2288,20912 | 484.836.674.563,99 |
| 2025 | 68336666,67       | 428,399287 | 199700000 | 2402,61957 | 509.078.508.292,19 |

Como se observa en las tablas 51 y 52, los dos procesos tienen ingresos por generación de energía eléctrica.

Luego de calcular los ingresos, se calcularon los costos de cada una de las alternativas de aprovechamiento de bagazo de caña de azúcar.

En las tablas 53y 54, se presentan los costos para la producción de papel, los cuales se distribuyeron de la siguiente manera:

- Materias primas: Bagazo, hidróxido de sodio, cal, dióxido de cloro
- Servicios: Agua suavizada, Agua residual tratada, energía eléctrica
- Transporte: Del bagazo de los ingenios a la planta de producción de papel
- Mano de obra
- Mantenimiento

En la tabla 55, se muestran los costos para la cogeneración de energía, en donde se tuvo en cuenta como materia prima el bagazo; como servicios el agua suavizada, el agua residual tratada y la energía eléctrica; la mano de obra y el mantenimiento.

**Tabla 53:**  
**Cálculo de los costos para la producción de papel (a)**

| Año  | Materias Primas |            |                    |            |         |            |                  |            |
|------|-----------------|------------|--------------------|------------|---------|------------|------------------|------------|
|      | Bagazo          |            | Hidróxido de sodio |            | Cal     |            | Dióxido de cloro |            |
|      | Ton             | \$/Ton     | Kg                 | \$/Kg      | Kg      | \$/Kg      | Kg               | \$/Kg      |
| 2015 | 912000          | 30000      | 51570000           | 4500       | 9150000 | 540        | 241800           | 9600       |
| 2016 | 912000          | 31500      | 51570000           | 4725       | 9150000 | 567        | 241800           | 10080      |
| 2017 | 912000          | 33075      | 51570000           | 4961,25    | 9150000 | 595,35     | 241800           | 10584      |
| 2018 | 912000          | 34728,75   | 51570000           | 5209,3125  | 9150000 | 625,1175   | 241800           | 11113,2    |
| 2019 | 912000          | 36465,1875 | 51570000           | 5469,77813 | 9150000 | 656,373375 | 241800           | 11668,86   |
| 2020 | 912000          | 38288,4469 | 51570000           | 5743,26703 | 9150000 | 689,192044 | 241800           | 12252,303  |
| 2021 | 912000          | 40202,8692 | 51570000           | 6030,43038 | 9150000 | 723,651646 | 241800           | 12864,9182 |
| 2022 | 912000          | 42213,0127 | 51570000           | 6331,9519  | 9150000 | 759,834228 | 241800           | 13508,1641 |
| 2023 | 912000          | 44323,6633 | 51570000           | 6648,5495  | 9150000 | 797,82594  | 241800           | 14183,5723 |
| 2024 | 912000          | 46539,8465 | 51570000           | 6980,97697 | 9150000 | 837,717237 | 241800           | 14892,7509 |
| 2025 | 912000          | 48866,8388 | 51570000           | 7330,02582 | 9150000 | 879,603098 | 241800           | 15637,3884 |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 54:**  
**Cálculo de los costos para la producción de papel (b)**

| Año  | Servicios      |            |                       |            |                   |            | Transporte | Mano de Obra     | Mantenimiento | TOTAL COSTOS       |
|------|----------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|------------|------------|------------------|---------------|--------------------|
|      | Agua suavizada |            | Agua Residual tratada |            | Energía eléctrica |            |            |                  |               |                    |
|      | m3             | \$/m3      | m3                    | \$/m3      | kWh               | \$/kWh     | \$         | \$               | \$            | \$                 |
| 2015 | 5810           | 130        | 10815040              | 70         | 78412694,4        | 263        | 768908868  | 4.107.731.250,00 | 38.595.693,08 | 292.982.862.549,98 |
| 2016 | 5810           | 136,5      | 10815040              | 73,5       | 78412694,4        | 276,15     | 768908868  | 4.313.117.812,50 | 40.525.477,73 | 307.593.560.234,08 |
| 2017 | 5810           | 143,325    | 10815040              | 77,175     | 78412694,4        | 289,9575   | 768908868  | 4.528.773.703,13 | 42.551.751,62 | 322.934.792.802,38 |
| 2018 | 5810           | 150,49125  | 10815040              | 81,03375   | 78412694,4        | 304,455375 | 768908868  | 4.755.212.388,28 | 44.679.339,20 | 339.043.086.999,10 |
| 2019 | 5810           | 158,015813 | 10815040              | 85,0854375 | 78412694,4        | 319,678144 | 768908868  | 4.992.973.007,70 | 46.913.306,16 | 355.956.795.905,65 |
| 2020 | 5810           | 165,916603 | 10815040              | 89,3397094 | 78412694,4        | 335,662051 | 768908868  | 5.242.621.658,08 | 49.258.971,46 | 373.716.190.257,53 |
| 2021 | 5810           | 174,212433 | 10815040              | 93,8066948 | 78412694,4        | 352,445153 | 768908868  | 5.504.752.740,98 | 51.721.920,04 | 392.363.554.327,01 |
| 2022 | 5810           | 182,923055 | 10815040              | 98,4970296 | 78412694,4        | 370,067411 | 768908868  | 5.779.990.378,03 | 54.308.016,04 | 411.943.286.599,96 |
| 2023 | 5810           | 192,069208 | 10815040              | 103,421881 | 78412694,4        | 388,570782 | 768908868  | 6.068.989.896,93 | 57.023.416,84 | 432.502.005.486,56 |
| 2024 | 5810           | 201,672668 | 10815040              | 108,592975 | 78412694,4        | 407,999321 | 768908868  | 6.372.439.391,78 | 59.874.587,68 | 454.088.660.317,49 |
| 2025 | 5810           | 211,756301 | 10815040              | 114,022624 | 78412694,4        | 428,399287 | 768908868  | 6.691.061.361,37 | 62.868.317,07 | 476.754.647.889,96 |

**Tabla 55:**  
**Cálculo de los costos para la cogeneración de energía**

| Año  | Materias Primas |            | Servicios      |            |                       |            |                   |            | Mano de Obra      | Mantenimiento | TOTAL COSTOS       |
|------|-----------------|------------|----------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|---------------|--------------------|
|      | Bagazo          |            | Agua suavizada |            | Agua Residual tratada |            | Energía eléctrica |            |                   |               |                    |
|      | Ton             | \$/Ton     | m3             | \$/m3      | m3                    | \$/m3      | kWh               | \$/kWh     | \$                | \$            | \$                 |
| 2015 | 5167300         | 30000      | 253200         | 130        | 253200                | 70         | 3652500           | 263        | 21.360.202.500,00 | 18.000.000,00 | 177.408.450.000,00 |
| 2016 | 5167300         | 31500      | 253200         | 136,5      | 253200                | 73,5       | 3652500           | 276,15     | 22.428.212.625,00 | 18.900.000,00 | 186.278.872.500,00 |
| 2017 | 5167300         | 33075      | 253200         | 143,325    | 253200                | 77,175     | 3652500           | 289,9575   | 23.549.623.256,25 | 19.845.000,00 | 195.592.816.125,00 |
| 2018 | 5167300         | 34728,75   | 253200         | 150,49125  | 253200                | 81,03375   | 3652500           | 304,455375 | 24.727.104.419,06 | 20.837.250,00 | 205.372.456.931,25 |
| 2019 | 5167300         | 36465,1875 | 253200         | 158,015813 | 253200                | 85,0854375 | 3652500           | 319,678144 | 25.963.459.640,02 | 21.879.112,50 | 215.641.079.777,81 |
| 2020 | 5167300         | 38288,4469 | 253200         | 165,916603 | 253200                | 89,3397094 | 3652500           | 335,662051 | 27.261.632.622,02 | 22.973.068,13 | 226.423.133.766,70 |
| 2021 | 5167300         | 40202,8692 | 253200         | 174,212433 | 253200                | 93,8066948 | 3652500           | 352,445153 | 28.624.714.253,12 | 24.121.721,53 | 237.744.290.455,04 |
| 2022 | 5167300         | 42213,0127 | 253200         | 182,923055 | 253200                | 98,4970296 | 3652500           | 370,067411 | 30.055.949.965,77 | 25.327.807,61 | 249.631.504.977,79 |
| 2023 | 5167300         | 44323,6633 | 253200         | 192,069208 | 253200                | 103,421881 | 3652500           | 388,570782 | 31.558.747.464,06 | 26.594.197,99 | 262.113.080.226,68 |
| 2024 | 5167300         | 46539,8465 | 253200         | 201,672668 | 253200                | 108,592975 | 3652500           | 407,999321 | 33.136.684.837,26 | 27.923.907,89 | 275.218.734.238,01 |
| 2025 | 5167300         | 48866,8388 | 253200         | 211,756301 | 253200                | 114,022624 | 3652500           | 428,399287 | 34.793.519.079,13 | 29.320.103,28 | 288.979.670.949,91 |



Seguidamente, se procedió a calcular las utilidades antes de los impuestos para cada alternativa de aprovechamiento restando los costos totales de los ingresos totales. A estas utilidades se les restó la depreciación asumida que fue del 10%. Luego se restaron los impuestos a utilidades y a patrimonio asumidos y se obtuvieron las utilidades después de impuestos. Seguidamente se calculó el valor presente útil y el valor presente neto y la Tasa Interna de Retorno como se muestra en los anexos 1 y 2.

## 5.2 Análisis de los Stakeholders

### 5.2.1 Intereses de los stakeholders

A partir de las actividades realizadas para el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar se definieron los actores presentes en cada uno de los procesos y se distribuyeron como se muestra en la Figura 29 y la tabla 56.



**Figura 29. Grupos de Stakeholders asociados al proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 56:**  
**Stakeholders del Proceso de Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar**

| Stakeholders                   | Producción de Vapor   | Producción de Papel   |
|--------------------------------|---|---|
| Inversionistas y accionistas   | Son los ingenios azucareros, encargados de obtener el bagazo en el proceso de la molienda, utilizar la cantidad suficiente para abastecer sus calderas, y vender el restante a la industria papelera.                       | Carvajal Pulpa y Papel, quien compra el bagazo a los ingenios para producir papel. Dicha empresa tiene el 60% de Accionistas Colombianos y el 40% de inversionistas extranjeros.  |
| Trabajadores                   | Los trabajadores identificados en los ingenios son las personas que realizan trabajos relacionados con el proceso de cogeneración   | Los trabajadores de la empresa Carvajal Pulpa y Papel, pertenecen en su totalidad a este grupo de stakeholders.   |
| Autoridades Ambientales        | Las autoridades ambientales encargadas de hacer seguimiento al aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, son la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC y la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC. | Las autoridades ambientales encargadas de hacer seguimiento al aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, son la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC y la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC. |
| Entidades del sector Azucarero | Las entidades del Sector azucarero son lideradas y por ASOCAÑA: CENICAÑA, TECNICAÑA y PROCAÑA   | Las entidades del Sector azucarero son lideradas y por ASOCAÑA: CENICAÑA, TECNICAÑA y PROCAÑA   |
| Municipios                     | Los municipios involucrados en el proceso son en donde se encuentran ubicados los ingenios azucareros.  | Municipios de Yumbo y Caloto, en donde se encuentran situadas las Plantas 1 y 2 de la empresa Carvajal Pulpa y Papel  |
| Comunidad                      | Habitantes del área de influencia de los Ingenios   | Habitantes del área de influencia de Carvajal Pulpa y Papel   |
| Clientes                       | Los mismos ingenios son los clientes de la energía y el vapor suministrado.   | Entidades que compran el papel a Carvajal Pulpa y Papel   |
| Proveedores                    | Cultivadores de caña de azúcar  | Ingenios<br>Proveedores de hidróxido de sodio, dióxido de cloro y cal   |
| Sector educativo               | Universidades interesadas en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar   | Universidades interesadas en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar   |
| Competencia                    | Proveedores de carbón   | Otras empresas productoras de papel a partir de madera  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

En la tabla 57 se presentan los intereses de los stakeholders dentro del proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Estos intereses se determinaron a partir de la visita realizada, las charlas con las entidades, los informes de sostenibilidad de las empresas involucradas y archivos de periódicos.

**Tabla 57.**  
**Intereses de las Stakeholders**

| <b>Stakeholders</b>            | <b>Intereses</b>  |
|--------------------------------|---|
| Inversionistas y accionistas   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obtener dividendos y revalorización de las acciones</li> <li>- Ampliación hacia nuevos mercados</li> <li>- Obtener liquidez y solvencia</li> <li>- Tradición de las empresas</li> </ul>          |
| Trabajadores y sindicatos      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora salarial</li> <li>- Seguridad Social</li> <li>- Mejoras en los contratos laborales</li> <li>- Formación y desarrollo laboral</li> <li>- Subsidios</li> <li>- Riesgos laborales</li> </ul> |
| Autoridades Ambientales        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cumplimiento con la legislación ambiental</li> <li>- Mejoramiento tecnológico</li> <li>- Cumplimiento de las compensaciones</li> </ul>   |
| Entidades del sector Azucarero | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora del Cluster azucarero</li> <li>- Sostenibilidad del sector</li> </ul>   |
| Municipios                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cumplimiento de programas de compensación</li> <li>- Mejoras económicas</li> <li>- Mejoras sociales</li> <li>- Mejoramiento ambiental</li> </ul>   |
| Comunidad                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oportunidades de empleo</li> <li>- Beneficios sociales y culturales</li> <li>- Seguridad en salud pública</li> <li>- Mejoramiento ambiental</li> </ul>   |
| Clientes                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejores precios de los productos</li> <li>- Calidad de los productos</li> </ul>  |
| Proveedores                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Más producción</li> </ul>  |
| Sector educativo               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oportunidades laborales para sus egresados</li> <li>- I+D</li> </ul>   |
| Competencia                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oportunidad de entrar al mercado</li> </ul>  |

## 5.2.2 Matriz Poder / Interés

En la Tabla 58 se presenta la valoración de los grupos de interés involucrados en el proceso de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar y en la Tabla 59 la ubicación de los stakeholders en sus respectivos cuadrantes.

**Tabla 58:**  
**Valoración de los grupos de interés**

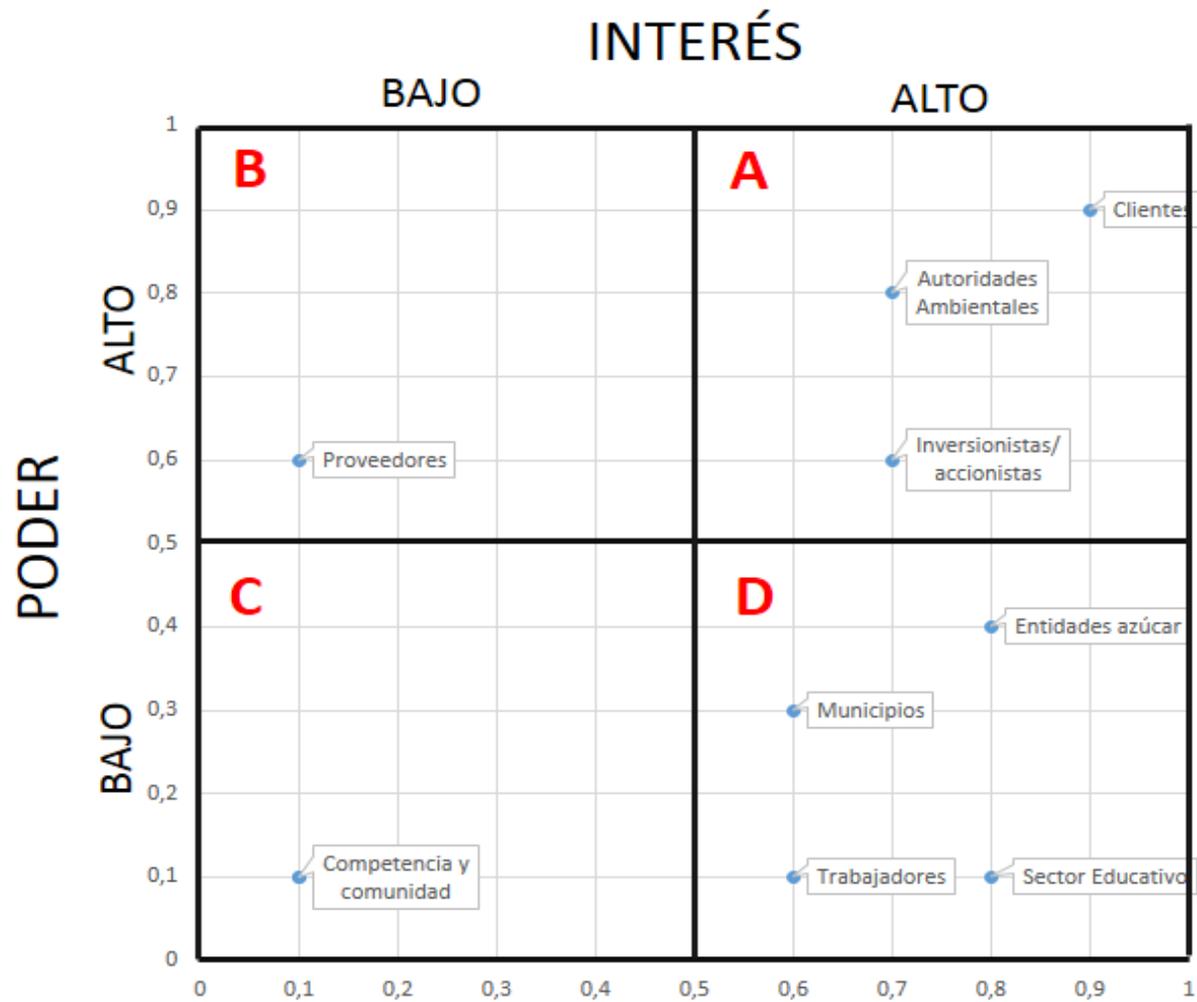
| Stakeholders                   | Valoración de cada magnitud |       |         |       |
|--------------------------------|-----------------------------|-------|---------|-------|
|                                | Poder                       |       | Interés |       |
|                                | Vapor                       | Papel | Vapor   | Papel |
| Inversionistas y accionistas   | 0.6                         | 0.3   | 0.7     | 0.7   |
| Trabajadores y sindicatos      | 0.1                         | 0.3   | 0.6     | 0.8   |
| Autoridades Ambientales        | 0.8                         | 0.8   | 0.7     | 0.7   |
| Entidades del sector Azucarero | 0.4                         | 0.2   | 0.8     | 0.6   |
| Municipios                     | 0.3                         | 0.3   | 0.6     | 0.6   |
| Comunidad                      | 0.1                         | 0.1   | 0.1     | 0.2   |
| Clientes                       | 0.9                         | 0.3   | 0.9     | 0.6   |
| Proveedores                    | 0.6                         | 0.6   | 0.1     | 0.1   |
| Sector educativo               | 0.1                         | 0.1   | 0.8     | 0.8   |
| Competencia                    | 0.1                         | 0.1   | 0.1     | 0.1   |

**Tabla 59:**  
**Ubicación de los stakeholders en los respectivos cuadrantes**

| Stakeholder                        | Cuadrante |       |
|------------------------------------|-----------|-------|
|                                    | Vapor     | Papel |
| Inversionistas y accionistas (I)   | A         | D     |
| Trabajadores y sindicatos (T)      | D         | D     |
| Autoridades Ambientales (A)        | A         | A     |
| Entidades del sector Azucarero (E) | D         | D     |
| Municipios (M)                     | D         | D     |
| Comunidad (Co)                     | C         | C     |
| Clientes (Cl)                      | A         | D     |
| Proveedores (P)                    | B         | B     |
| Sector educativo (Se)              | D         | D     |
| Competencia (Cp)                   | C         | C     |

Luego de valorar los grupos, se realizó el respectivo mapeo de los stakeholders como se muestra en las figuras 30 y 31 para cada tipo de aprovechamiento.





**Figura 30. Mapeo de Stakeholders proceso de Producción de Vapor**  
 Fuente: Elaboración propia, 2015

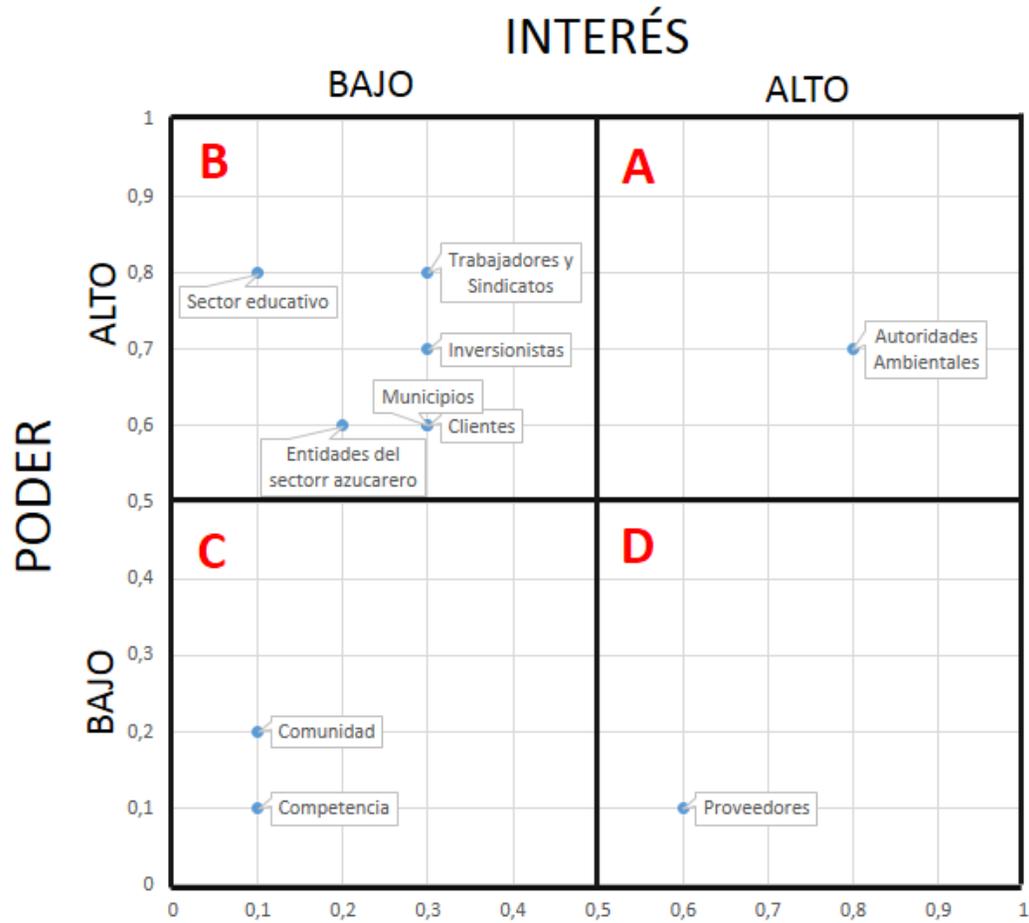


Figura 31. Mapeo de Stakeholders proceso de Producción de Papel  
Fuente: Elaboración propia, 2015

En cuanto a los inversionistas y accionistas, los ingenios han demostrado gran interés en la aplicación de tecnologías eficientes para la cogeneración, puesto que el ahorro en energía eléctrica para sus procesos es grande y las ventas a la red nacional significan un beneficio importante para los flujos de caja. En el caso del papel, la empresa desde sus inicios ha tenido épocas difíciles en cuanto a su sostenibilidad económica. Para los años 90 tuvo una crisis fuerte debido a los efectos de la apertura económica, sin embargo con el apoyo de inversionistas extranjeros ha logrado sostenerse como una empresa tradicional del Valle del Cauca.

Los trabajadores de los Ingenios son los encargados del proceso de cogeneración, por lo tanto son personas especializadas en el mantenimiento de los equipos electrónicos y mecánicos de las calderas; además se encuentra una mano de obra muy reducida para la adecuación del bagazo para su posterior quema. En el caso de Carvajal Pulpa y Papel, la empresa cuenta con 1500 trabajadores con condiciones laborales estables.

Las Autoridades Ambientales como la CVC y la CRC, son un grupo que tiene un nivel de poder importante, ya que son las entidades encargadas de velar por el cumplimiento normativo en cuanto a emisiones, vertimientos, residuos sólidos y uso de los recursos naturales. De la misma manera, se interesan desde las políticas de gestión ambiental por la sustentabilidad de las actividades productivas de su región. Sin embargo, su puntuación no es más alta debido a que todavía está por mejorar su gestión en cuanto al uso y manejo eficiente del recurso agua.

Las entidades del sector azucarero muestran gran interés en lo que tiene que ver con la cogeneración. ASOCAÑA se encuentra interesada en diversificar el uso del bagazo hacia bioplásticos u otros usos, teniendo en cuenta la visión de biorefinerías. Otras entidades consideran que la cogeneración es el uso más factible que se le puede dar al bagazo. Sin embargo, no se reconoce un nivel de poder en este grupo tan importante como el de los mismos ingenios.

En cuanto a los municipios, en materia de Ordenamiento Territorial presentan inconvenientes de uso del suelo, ya que los ingenios azucareros ocupan casi toda la tierra productiva del río Cauca, en el departamento del Valle, desplazando otras alternativas de uso tales como especies frutales, las cuales de alguna manera generarían mayor empleo para los habitantes del sector y con ello se mejoraría su calidad de vida

(Cerón , Cerón, & Cerón, 2014). Sin embargo, su nivel de poder frente a los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar no es alto, así su interés si lo sea.

Lo anterior también tiene que ver con la comunidad como grupo de interés, porque así como en la industria del azúcar, en el aprovechamiento del bagazo no se requiere mano de obra en grandes cantidades, sobre todo si se analiza el uso más importante en la actualidad que es la cogeneración. Tal vez si existiera diversidad de usos, también existirían más oportunidades de acceso a empleo.

Los ingenios como clientes del vapor y la energía producida por el proceso de cogeneración, presentan niveles altos de poder e importancia en el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Por el lado de Carvajal Pulpa y Papel, los clientes presentan interés, sin embargo el poder no es considerable.

Los proveedores del bagazo son los mismos ingenios, sin embargo, de su materia prima son los mismos proveedores de caña de azúcar. En la actualidad, los productores de caña ya han iniciado sus gestiones para incluir en el costo de la caña de azúcar el costo del bagazo como combustible. Cuando históricamente han existido problemas entre el Estado, los productores de caña de azúcar y los Ingenios, la empresa Carvajal Pulpa y Papel se ve afectada en su producción.

Las Universidades de la región y otras de orden nacional, siempre han mostrado interés en los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, sin embargo su nivel de poder en la toma de decisiones económicas, políticas y sociales, es bajo.

En el mapeo de los stakeholders se logra evidenciar que las autoridades ambientales juegan un papel muy importante en los dos procesos, por lo que se posicionan en el cuadrante A en los dos procesos. Se encuentra también que para el proceso del papel la mayoría de grupos se posicionan en el cuadrante B por lo que se deduce que para este proceso el interés por el adecuado aprovechamiento del residuo existe, pero los actores no tienen poder económico, político para poder actuar.

En el mapeo del proceso de vapor se evidencia una buena posición de los clientes y accionistas, que para este caso son los ingenios azucareros, debido a que ellos mismos serán los que hacen uso del producto que es el vapor.

### **5.3 Proceso Analítico Jerárquico: Indicador de Sustentabilidad**

Teniendo en cuenta que en la teoría de la sustentabilidad, las dimensiones ambiental, económica y social, juegan un papel relevante, importante y definitivo para lograr la sustentabilidad, se tomó cada dimensión con un peso máximo de 1. Lo que quiere decir que el proceso que más se acerque a 3 es más sustentable y el que más se acerque a cero es menos sustentable. En función de lo anterior, cada dimensión distribuye sus subcomponentes para que la suma de sus mayores puntajes sea 1.

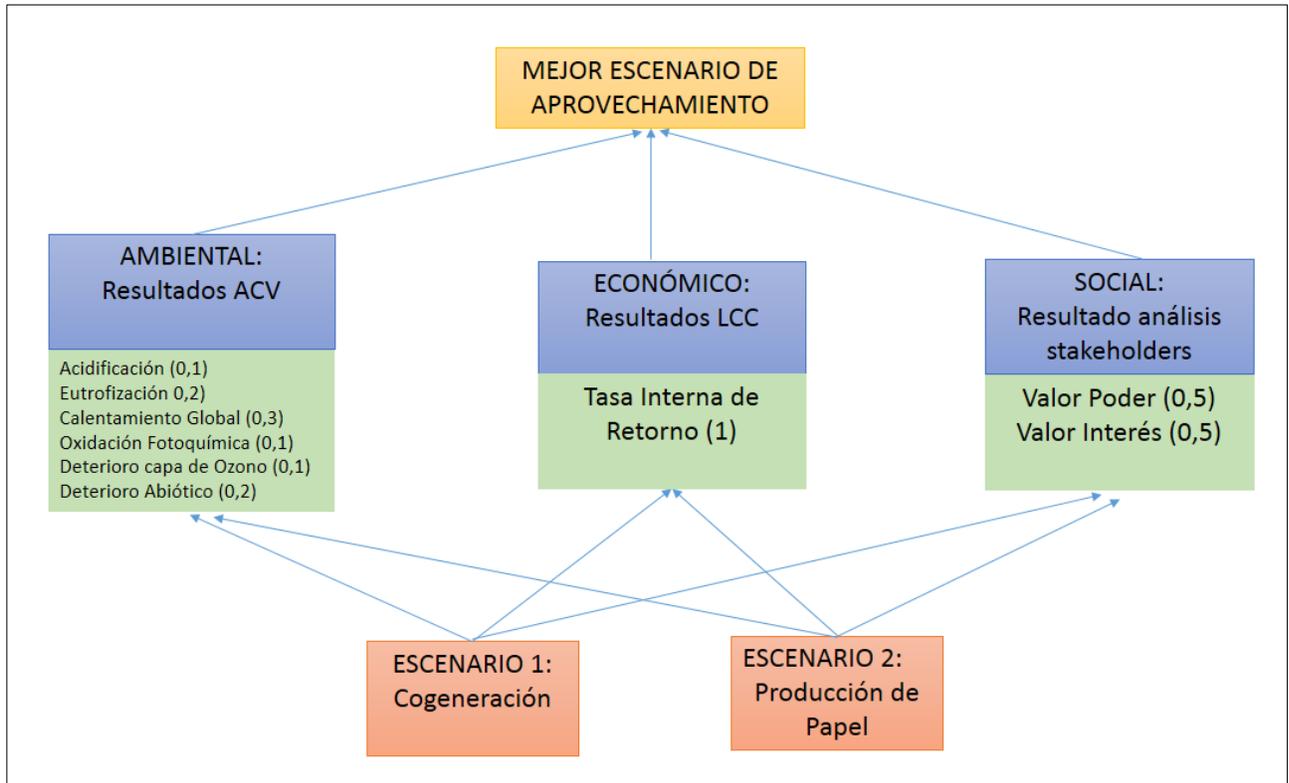
Para determinar el peso de los indicadores en la dimensión ambiental, se recurrió a estudios anteriores similares de Impacto Ambiental en Biocombustibles y específicamente de etanol, azúcar y papel, para en función de la importancia de los impactos ambientales se otorgara el peso respectivo. Calentamiento global se considera como la categoría más importante por lo que se le otorgó el mayor puntaje 0.3. Se consideró que las siguientes categorías en grado de importancia son eutrofización y deterioro abiótico, por lo que se les otorgó como mayor puntaje 0.2. Las otras tres categorías: acidificación, deterioro de la capa de ozono y oxidación fotoquímica se les asignó un peso máximo de 0.1.

Para otorgar la calificación a cada categoría se analizaron los resultados obtenidos con los resultados de otras formas de generar los mismos productos. Por ejemplo, en el caso del vapor se comparó con vapor producido con combustibles convencionales como el carbón y para el caso del Papel, se comparó con los resultados obtenidos para las mismas categorías de impacto de papel kraft producido con blanqueo y sin blanqueo.

Para la dimensión económica, se tomó como único indicador el comportamiento de la Tasa Interna de Retorno de cada uno de los procesos y para la dimensión social, se

tomaron con igual peso los resultados del análisis de stakeholders en las variables de Poder e Interés.

En la Figura 32 se muestran los pesos dados a las dimensiones de la sustentabilidad y a sus respectivos subcomponentes y en la tabla 60 los resultados del análisis.



**Figura 32. Proceso Analítico Jerárquico: Indicador de Sustentabilidad**

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 60:**

**Análisis de la Sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar por AHP**

| DIMENSIÓN   | Valor max | Producción de Vapor               |                   | Producción de Papel                 |                   |
|---|-----------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|
|   |           | Valor                             | Calificación      | Valor                               | Calificación      |
| <b>Dimensión Ambiental: ACV (1)</b>                   |           |                                   |                   |                                     |                   |
| Acidificación (0,1)                                   | 0,1       | 0.00117 Kg de SO2-eq              | <b>0,07214286</b> | 0.747 Kg de SO2-eq                  | <b>0,05913043</b> |
| Eutrofización (0,2)                                   | 0,2       | 2.32 Kg de PO4-eq                 | <b>0</b>          | 0.293 Kg de PO4-eq                  | <b>0,0968254</b>  |
| Calentamiento Global (0,3)                            | 0,3       | 2 Kg de CO2-eq                    | <b>0</b>          | 101 Kg de CO2-eq                    | <b>0,18905325</b> |
| Oxidación Fotoquímica (0,1)                           | 0,1       | 0.0106 Kg de C2H4-eq              | <b>0</b>          | 0.0324 Kg de C2H4-eq                | <b>0,05585317</b> |
| Deterioro capa de Ozono (0,1)                         | 0,1       | 2.67e <sup>-10</sup> Kg de CFC-eq | <b>0,1</b>        | 9.1e <sup>-6</sup> Kg de CFC-eq     | <b>0,06111111</b> |
| Deterioro Abiótico (0,2)                              | 0,2       | 2.04e <sup>-7</sup> Kg de Sb-eq   | <b>0</b>          | 0.000498e <sup>-7</sup> Kg de Sb-eq | <b>0</b>          |
| <b>Total Dimensión Ambiental</b>                      | <b>1</b>  |                                   | <b>0,17214286</b> |                                     | <b>0,46197337</b> |
| <b>Dimensión Económica: LCC (1)</b>                   |           |                                   |                   |                                     |                   |
| Tasa Interna de Retorno                               | 1         | 0,335 Adimensional                | <b>0,8</b>        | 1,816 Adimensional                  | <b>1</b>          |
| <b>Total Dimensión Económica</b>                      | <b>1</b>  |                                   | <b>0,8</b>        |                                     | <b>1</b>          |
| <b>Dimensión Social: Análisis de Stakeholders (1)</b> |           |                                   |                   |                                     |                   |
| Poder   | 0,5       | 4                                 | 0,2               | 3,1                                 | 0,155             |
| Interés   | 0,5       | 5,4                               | 0,27              | 5,2                                 | 0,26              |
| <b>Total Dimensión Social</b>                         | <b>1</b>  |                                   | <b>0,47</b>       |                                     | <b>0,415</b>      |
| <b>Total sustentabilidad</b>                          | <b>3</b>  |                                   | <b>1,4421429</b>  |                                     | <b>1,8769734</b>  |

Fuente Elaboración propia, 2015



Como se puede evidenciar en la tabla 60, el actual aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar no tiene un nivel de sustentabilidad adecuado ya que para el vapor la metodología dio un resultado de 1.44 sobre 3 y para el papel un resultado de 1.87 sobre 3. Se puede deducir que la dimensión que más influye en estos resultados es la ambiental, debido a que se dieron las calificaciones más bajas a partir de la comparación con productos similares del software SIMAPRO.

Para el caso de la producción de vapor con bagazo, se comparó con la producción de vapor con carbón y la única categoría favorecida de las analizadas fue la acidificación. Es posible que el proceso de combustión no se esté dando de una manera eficiente y sea la razón de que la categoría calentamiento global no supere la del carbón.

Para el caso de la producción de papel, se comparó con la producción de papel Kraft con blanqueamiento y sin blanqueamiento y ninguna categoría de impacto obtuvo mejores resultados que con los procesos comparados. Se hace necesario revisar las concentraciones de dióxido de cloro aplicadas, ya que los resultados de la evaluación ambiental en el software muestran los impactos del proceso unitario de blanqueamiento.

En la dimensión económica, luego de realizar el LCC se tomó como indicador de sustentabilidad el comportamiento de la Tasa Interna de Retorno, que tuvo mejores resultados en el proceso de producción de papel. La Tasa Interna de Retorno baja en los procesos de cogeneración de vapor en los ingenios se puede deber a las grandes inversiones que se dan en la inversión inicial de los procesos de cogeneración.

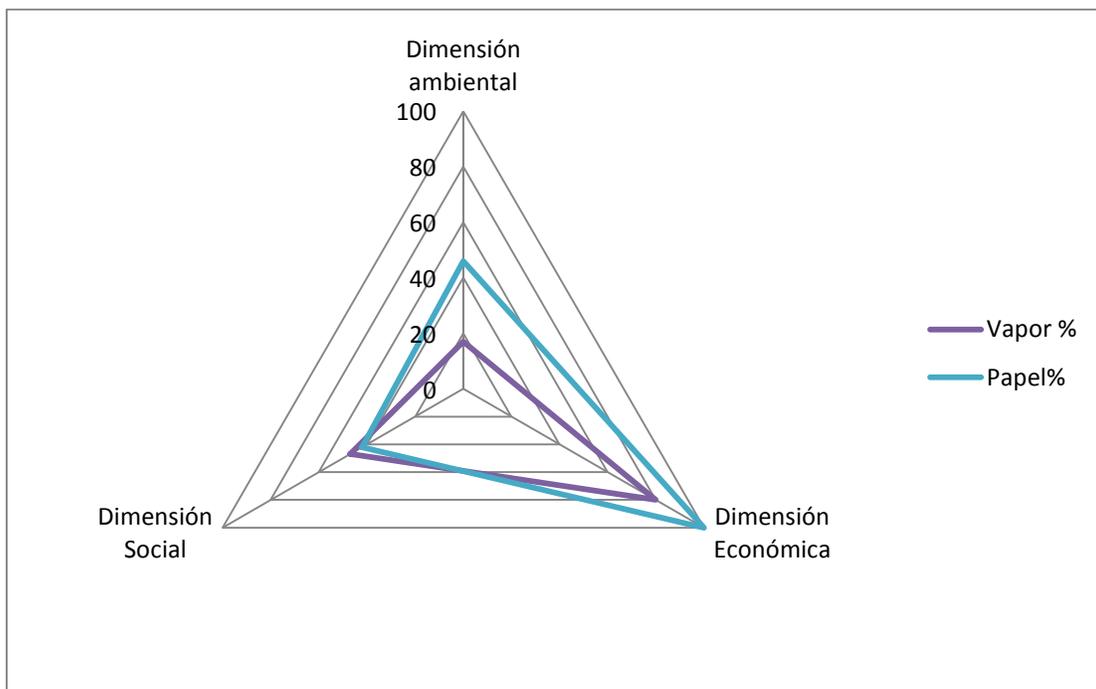
La dimensión social tuvo resultados similares en los dos procesos, sin embargo su nivel es muy bajo comparada con la dimensión económica. Esto se debe a la gran cantidad de grupos involucrados que presentan niveles bajos de poder e interés en el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.



## 6. RECOMENDACIONES DE SUSTENTABILIDAD

En este capítulo se presentan las recomendaciones al aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, teniendo en cuenta los resultados arrojados por el indicador de sostenibilidad construido a partir del Análisis del Ciclo de vida (ACV) en la dimensión ambiental, el Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC) en la dimensión económica y el análisis de los stakeholders en la dimensión social. De la misma manera, se tienen en cuenta aquí los resultados del diagnóstico descrito en el capítulo 3.

La figura 33 muestra gráficamente los resultados del indicador obtenido a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como punto de partida para hacer las recomendaciones respectivas. En dicha figura, que en la medida en que el porcentaje de sustentabilidad se aproxima a 100, la dimensión se acerca a la sustentabilidad, de lo contrario, cuando se aproxima a 0, significa que se aleja de dicho estado.



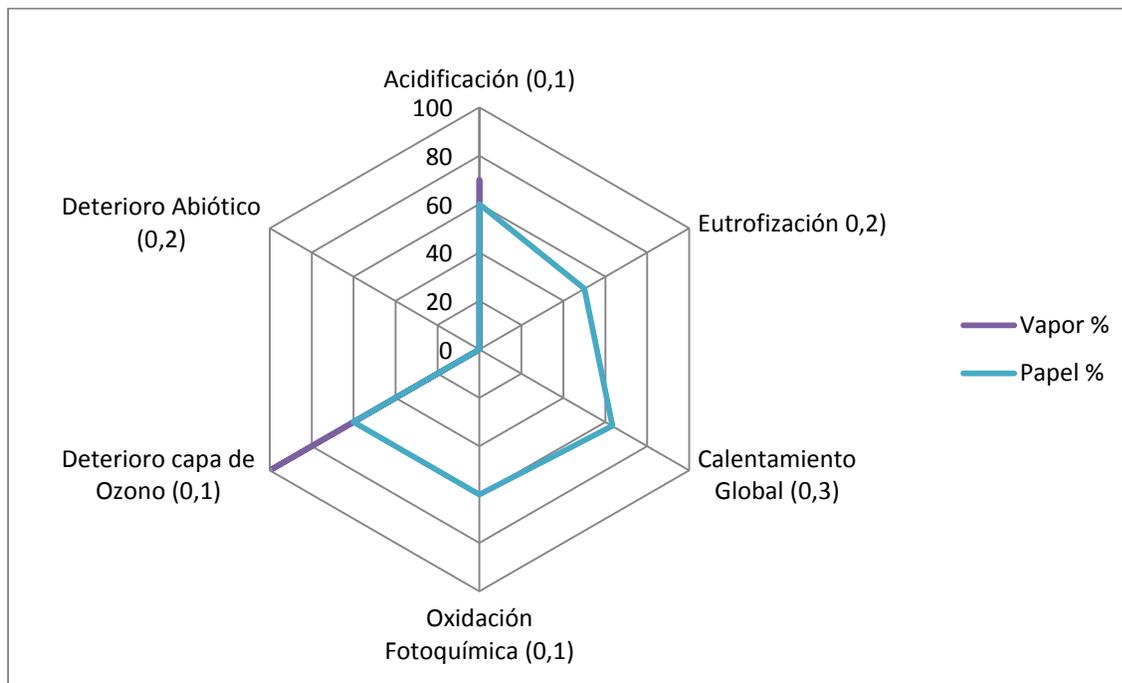
**Figura 33. Expresión gráfica del indicador de sustentabilidad**

Fuente: Elaboración propia, 2016

Teniendo en cuenta lo anterior, las recomendaciones de sustentabilidad se generaron para mejorar en gran medida la dimensión ambiental, que es la que según el indicador aparece como la más afectada para los dos procesos de aprovechamiento. De la misma manera, las recomendaciones en la dimensión económica, que tiene unos datos de sustentabilidad altos, se hacen con propuestas hacia lo económico, pero con un efecto positivo en las dimensiones ambiental y social. A continuación se presentan las recomendaciones por dimensión.

## 6.1 Recomendaciones a la Dimensión Ambiental

La dimensión ambiental es la más afectada en el indicador de sustentabilidad calculado ya que obtuvo un 17% para producción de vapor y menor al 50 % en la producción de papel. De manera más específica, la figura 34 muestra la calificación obtenida por las categorías de impacto resultado del ACV para cada proceso.



**Figura 34. Expresión gráfica de la dimensión ambiental de la sustentabilidad**

Fuente: Elaboración propia, 2016

Como lo representa la figura 34, el proceso de vapor tiene calificación de cero en cuatro categorías: Eutrofización, calentamiento global, oxidación fotoquímica y deterioro abiótico; Por lo que para los ingenios las recomendaciones están más enfocadas hacia disminuir las emisiones de  $SO_x$ ,  $NO_x$  y Material particulado, en el proceso que más genera impactos que es la caldera según el perfil medio ambiental. En el caso del papel, aunque sus resultados son mejores que los del vapor, presentan deficiencias en la categoría de deterioro abiótico debido en gran medida al efecto de sus vertimientos en cuerpos hídricos. A continuación se presentan las recomendaciones para cada aspecto ambiental analizado en el diagnóstico.

### **6.1.1 Uso eficiente del agua**

La disminución del consumo de agua en los dos procesos de aprovechamiento del bagazo, producción de papel y cogeneración de energía, ha sido relevante en los últimos años, gracias a los resultados de iniciativas como la mesa del agua cuyo objetivo es mejorar la eficiencia en el uso del agua en la parte plana y el piedemonte, por medio del uso de mejores prácticas de manejo del recurso hídrico, el Fondo Agua por la vida y la sostenibilidad, que hace una importante labor en el cuidado y conservación de las cuencas del Valle del Cauca (Cenicaña, 2013), y los programas de ahorro y uso eficiente del agua implementados en los ingenios y en la planta papelera. Se hace necesario que estos programas sigan siendo apoyados por Asocaña, Cenicaña, el Estado, la comunidad, de tal manera que sus metas se reflejen en la disminución del consumo de agua en los diferentes procesos.

Una alternativa de ahorro y uso eficiente de agua es el control del desperdicio de aguas de condensados provenientes de los equipos de calentamiento, que en la actualidad genera pérdidas económicas importantes ya que el tratamiento para su uso es muy costoso. Por lo anterior, se recomienda usar estos condensados como el agua de imbibición de la caña en el proceso de la molienda y en otros procesos de fábrica, de tal manera que se disminuya considerablemente el uso de agua cruda.

## 6.1.2 Manejo de los vertimientos

Para el caso del papel, teniendo en cuenta que en el diagnóstico a las plantas de tratamiento de aguas residuales del proceso del papel, se encontró que los parámetros de más difícil manejo son los Sólidos Suspendidos Totales SST y la temperatura (ya que en ocasiones no logra ser menor de 5°C del cuerpo receptor), y que los resultados de los impactos en las categorías de deterioro abiótico y eutrofización son tan bajos, se propone hacer un plan de mantenimiento y de control constante a las plantas de tratamiento y una optimización, involucrando actividades de investigación y desarrollo a los procesos de tratamiento actuales, haciendo énfasis en dichos parámetros, y buscando mantener la DBO y la DQO por debajo de la Resolución 631 de 2015.

En el caso de la cogeneración, los vertimientos del proceso son mínimos debido a la recirculación de agua del proceso que hacen los ingenios.

## 6.1.3 Consumo de energía

El ítem de consumo de energía es un aspecto positivo ambiental para los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, ya que en los dos se llevan a cabo procesos de cogeneración de energía. Se debe seguir mejorando en cuanto a la disminución de emisiones que se describen en el siguiente numeral, en el aumento de la generación de MW para poder alcanzar las metas de ventas a la red nacional, y en el mejoramiento en la eficiencia energética del bagazo como combustible.

De la misma manera, es importante que al interior de los ingenios y de la planta papelera, se realicen programas de sensibilización para los trabajadores, personal de la empresa y comunidades del área de influencia, para influir en la implementación de buenas prácticas en el consumo de energía tales como apagar la luz, uso de bombillas ahorradoras y en la implementación de sensores de movimiento para ahorro de luz en momentos en que no se requiere.

### **6.1.4 Control de las emisiones atmosféricas**

Las mejoras ambientales en el control de las emisiones atmosféricas más visibles en el sector cañicultor, se remontan al momento en que realizó el cambio tecnológico más importante que han tenido los ingenios que fue el paso de la producción de vapor por caldera a la planta de cogeneración de energía.

Las emisiones atmosféricas deben seguir disminuyéndose para que el proceso de cogeneración de energía sea todavía más limpio y cumpla con estándares internacionales. Por lo que se recomienda, en primera medida garantizar una mejor calidad del bagazo que llega a las calderas, por lo que se debe trabajar en disminuir su contenido de humedad y la producción de ceniza, de tal manera que se mejore la eficiencia energética y por ende se disminuyan las emisiones. De la misma manera, al mejorar la calidad del bagazo, se está disminuyendo la cantidad de combustible auxiliar que normalmente es fósil y genera emisiones de dióxidos de azufre y nitrógeno.

Un aspecto adicional que es relevante en la calidad del bagazo, es la preparación que recibe la caña antes de la molienda, ya que esta llega con contenidos altos de tierra, lo que es directamente proporcional a la generación de material particulado y aumentar el contenido de cenizas.

Teniendo en cuenta que tanto la cogeneración de energía como la producción de papel, en la actualidad queman bagazo y médula respectivamente, y que su principal contaminante es el material particulado, se recomienda la instalación de equipos de control de emisiones tales como colectores mecánicos, precipitadores electrostáticos, lavadores húmedos, u otros. Es importante que el respectivo emisor, tenga en cuenta el cumplimiento de requisitos ante la autoridad ambiental para la exención del impuesto sobre la renta por la compra de dichos equipos.

### 6.1.5 Manejo de los residuos sólidos

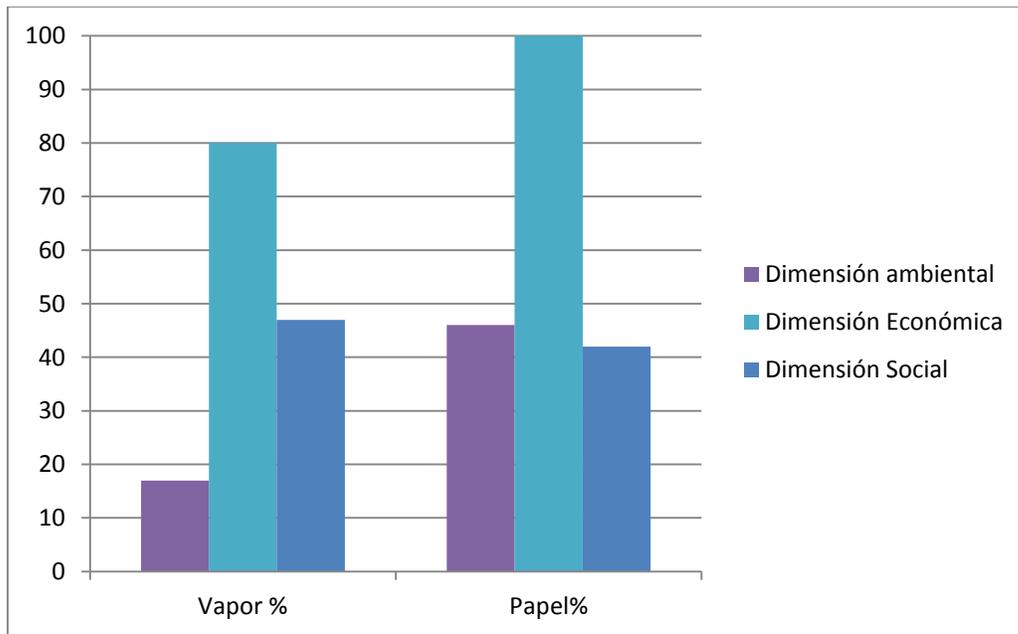
Tanto en los procesos de cogeneración de los ingenios azucareros, como en la planta papelera, se generan residuos sólidos ordinarios derivados del funcionamiento diario de las plantas. En esta situación, se requiere hacer seguimiento a la sensibilización del personal en el manejo de dichos residuos, a la ubicación y eficiencia de los ecopuntos para la buena disposición y separación en la fuente de dichos residuos, y a la adecuada localización del sitio de manejo de los residuos antes de la entrega para evitar riesgos en los trabajadores. En cuanto al manejo de los residuos peligrosos tales como aceites usados provenientes de las plantas de cogeneración, residuos de aditivos, canecas de pintura, partes de equipos inservibles, se debe tener claro el plan de manejo de dichos residuos.

Además de lo anterior, de los procesos de cogeneración se generan cenizas en cantidades tan importantes que en algunas ocasiones se convierten en un residuo de difícil manejo. Algunos ingenios utilizan la ceniza en sus plantas composteras como cama del bagacillo (bagazo de menor diámetro) y la cachaza (residuo de la producción de mieles) con lo que producen sus abonos.

En otros ingenios, la ceniza que se genera, no es aprovechada y adicionalmente está siendo almacenada a cielo abierto, lo que hace que las concentraciones de material particulado por acción del viento, aumenten en el área de influencia directa, causando enfermedades respiratorias en las personas. Estudios a estas cenizas, arrojan que su composición química contiene Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), en diferentes proporciones y poseen amorficidad en su estructura, propiedad que favorece la reactividad con el cemento, por lo que puede ser utilizada para la elaboración de materiales de construcción (Vidal, Torres, & González, 2014). Esta alternativa para las cenizas podría impactar de manera positiva en las tres dimensiones de la sustentabilidad, por lo que se recomienda terminar con las pruebas correspondientes y la búsqueda de un mercado estable para este subproducto.

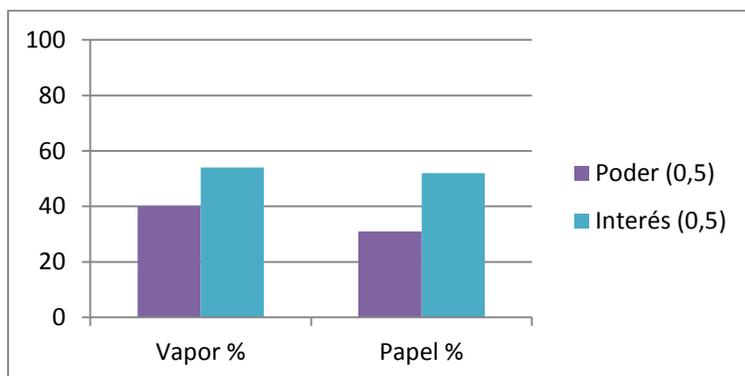
## 6.2 Recomendaciones a las Dimensiones Económica y Social

Con el Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC se logró analizar económicamente cada una de las alternativas de aprovechamiento desde la definición de los elementos de costos de interés, los ingresos, los costos de los servicios, la mano de obra y el mantenimiento, las utilidades después de impuestos. Teniendo en cuenta el cálculo de la Tasa Interna de Retorno TIR, se encontró que las dos formas de aprovechamiento del bagazo tienen unos adecuados rendimientos económicos por lo que para la dimensión económica es la más sustentable de las tres en el presente estudio como se observa en la figura 35.



**Figura 35. Comparación de las tres dimensiones de la sustentabilidad**  
Fuente: Elaboración propia, 2016

No sucede lo mismo en la dimensión social, ya que los resultados del indicador de sustentabilidad en ninguna de las alternativas de aprovechamiento logran alcanzar el 50% de la sustentabilidad, como se muestra en la figura 36 que grafica el poder y el interés de los stakeholders frente a los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar.



**Figura 36. Dimensión social de la sustentabilidad**

Fuente: Elaboración propia, 2016

La figura 36 indica que los stakeholders del proceso de aprovechamiento del papel, tienen bajo “poder”, lo que significa una baja capacidad de influencia económica, política y social para promover el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. En una mejor condición que los anteriores, los stakeholders del proceso de aprovechamiento de cogeneración de energía tienen un nivel de poder “medio”. En cuanto al interés, los dos procesos de aprovechamiento tienen stakeholders que tienen un interés moderado para aportar al proceso de aprovechamiento del bagazo. Lo anterior indica que no es posible emprender acciones que lleven al rendimiento económico sin que se involucre a los stakeholders en cada uno de los procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. Con este sustento, las recomendaciones de sustentabilidad que se hacen a continuación se enfocan en estrategias que permitan mantener la dimensión económica con los niveles de sustentabilidad actuales, pero con impacto en los componentes ambiental y social.

El sector azucarero colombiano apunta a ser líder en la agroindustria internacional por medio de estrategias de competitividad, sostenibilidad y generación de bienestar. Por lo que considera que el trabajo de la mano de sus stakeholders es clave en la búsqueda de la sostenibilidad (Asocaña, 2016). Por lo anterior, se considera que las estrategias propuestas desde el sector y que involucran los dos procesos de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, no deben ser excluidas de las recomendaciones de sustentabilidad, sino que partiendo de estas se proponen estrategias que aporten al mejoramiento de las dimensiones ambiental y social e incluso obtener mejores rendimientos económicos. En la tabla 61 se presentan estas estrategias y se dan recomendaciones específicas para mejorar la eficiencia de cada una de estas.

**Tabla 61:**  
**Recomendaciones a las estrategias desarrolladas por el sector**

| <b>Estrategia</b>                             | <b>Descripción</b>  | <b>Resultados a 2016<sup>3</sup></b>   | <b>Recomendación a la estrategia</b>  |
|---|---|--|---|
| Fondo de agua por la vida y la sostenibilidad | Estrategia que se viene desarrollando desde el año 2009 en donde se invierten recursos económicos provenientes de la industria azucarera, el sector privado, cooperación internacional, el estado y la comunidad en la conservación 22 cuencas hidrográficas que abastecen de agua potable a 29 municipios de la región.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión de 21.000 millones de pesos que han favorecido a familias ubicadas en la parte alta de las cuencas y zonas de conflicto</li> <li>- Realización de 636 proyectos productivos con las comunidades.</li> <li>- Fortalecimiento de 37 organizaciones comunitarias</li> </ul>              | <p>Para todos los procesos de aprovechamiento del bagazo que se adelanten, actuales y nuevos, se hará necesario contar con el recurso hídrico en buen estado. Es por esto que este programa es una estrategia fundamental.</p> <p>Es importante que se establezcan indicadores que den cuenta del avance en cada uno de los programas que se llevan a cabo, para que el fondo perdure en el tiempo y logre consolidarse como una estrategia continua para mejorar y conservar la calidad y cantidad de las fuentes hídricas de la región.</p> |
| Promoción de la innovación y el desarrollo    | El sector azucarero cuenta con el Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia (Cenicaña), que es la entidad encargada desde hace 38 años de adelantar procesos de investigación con el fin de mejorar la competitividad. Para el caso de los procesos de aprovechamiento del bagazo, interesan las investigaciones hechas a los procesos de fábrica. | <p>En fábrica se han adelantado trabajos en las siguientes líneas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso racional de energía</li> <li>- Operaciones unitarias en las plantas de alcohol y azúcar</li> <li>- Control automático de procesos</li> <li>- Etanol carburante</li> <li>- Aseguramiento de la información</li> </ul> | Se recomienda que se involucren proyectos de investigación hacia la sostenibilidad de los subproductos de la caña, no sólo el bagazo, sino la ceniza, cachaza, bagacillo, residuos de cosecha, que logren aportar al mejoramiento de las dimensiones ambiental y social del sector.   |
| Programa Familias con bienestar               | Con este programa Asocaña y el ICBF se aliaron para trabajar desde el año 2009 con las familias vulnerables del área de influencia. Se trabajan temas de Convivencia, Ciudadanía, Hábitos saludables, Erradicación de la violencia intrafamiliar y trabajo infantil, Prevención del embarazo adolescente y Derechos   | <p>Las acciones encaminadas han sido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacitación de profesionales</li> <li>- Caracterización de familias</li> <li>- Sesiones pedagógicas como visitas domiciliarias y talleres grupales</li> <li>- Atención psicológica</li> <li>- Certificación de familias</li> </ul>                   | <p>Se recomienda a este programa de familias con bienestar, que se incluyan las posibilidades de empleo para las familias ya caracterizadas.</p> <p>En el caso del aprovechamiento del bagazo, nuevas formas de aprovechamiento que incluyan la demanda de mano de obra, pueden ser una buena posibilidad para estas familias.</p>  |

<sup>3</sup> Los datos e impactos de estas estrategias fueron tomados del último informe de sostenibilidad del sector azucarero (Asocaña, 2016).

| Estrategia   | Descripción  | Resultados a 2016 <sup>4</sup>  | Recomendación a la estrategia   |
|--|--|---|---|
| Programa comunidades rurales                               | Programa piloto aplicado a 500 familias de la zona rural de dos municipios. Buscó fortalecer las familias para fomentar la cohesión social del territorio              | Las acciones encaminadas fueron:<br>- Caracterización del contexto y de las familias<br>- Generación de capacidades, rutas de atención, planes de vida familiares incluyendo suficiencia alimentaria<br>- Acciones de prevención de embarazo adolescente<br>- Articulación interinstitucional | Se recomienda aplicar en la totalidad del área de influencia.<br>En el caso del aprovechamiento del bagazo, nuevas formas de aprovechamiento que incluyan la demanda de mano de obra, pueden ser una buena posibilidad para estas familias.   |
| Programa Uno por cada Uno                                  | Programa para incorporar nuevas tecnologías a los procesos formativos de los estudiantes y a la capacitación docente en la educación primaria de las escuelas públicas | Las acciones encaminadas han sido:<br>- Dotación individual de computadores con programas educativos<br>- Formación de docentes en métodos de aprendizaje   | Se recomienda que los programas educativos que se adelanten de aquí en adelante involucren formación y sensibilización en la industria azucarera para dar más sentido de pertenencia del área en donde habitan los niños.<br>Es importante articular estos programas educativos con los dos anteriores para que la falta de empleo de los padres no sea motivo de inasistencia escolar o enfermedades |
| Capacitación y desarrollo de competencias en colaboradores | Con la colaboración del SENA, se han capacitado colaboradores desde el año 2010 al 2015  | De los 28.217 colaboradores capacitados, el 84% lo hizo en formación para el trabajo y un 16% en formación especializada.   | Se recomienda que estas capacitaciones continúen durante todos los años. Pero sería más importante que se lograra mayor vinculación de los capacitados. Por lo anterior, los nuevos mercados para el aprovechamiento del bagazo, pueden ser un tema de capacitación.  |

Fuente: Elaboración propia, 2016

<sup>4</sup> Los datos y resultados de estas estrategias fueron tomados del último informe de sostenibilidad del sector azucarero (Asocaña, 2016).

Además de las anteriores recomendaciones sobre los programas existentes enfocados a la sustentabilidad, se proponen las siguientes recomendaciones que pueden mejorar las dimensiones social y ambiental del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar:

- El entender los ingenios como un parque industrial ecoeficiente, permite el uso sostenible de los subproductos. Los avances que ha tenido el sector azucarero de la región del Valle del Cauca en este aspecto, la convierten en la industria agroindustrial más eficiente del país. Es así como en la actualidad, no sólo se produce azúcar, sino que se cogenera energía y vapor con el bagazo como combustible, las mieles se utilizan para producir azúcar, etanol para los carros, etanol para alcohol etílico y como alimento para animales, se vende CO<sub>2</sub> para hacer bicarbonato, etc. Se hace necesario ahora, vincular a la comunidad en estos procesos de tal manera que al aprovechar un subproducto como el bagazo, ésta pueda tener la posibilidad de encontrar nuevos puestos de trabajo y nuevos mercados para comercializar los nuevos productos.

- Cenicaña como centro de investigación de la caña de azúcar podría impulsar la investigación en la búsqueda de formas de aprovechamiento e impulsar las iniciativas que ya se han dado en la región, como la elaboración de tableros y mampostería liviana, la producción de etanol lignocelulósico, la fabricación de bioplásticos, etc. La investigación en este tema necesitaría alianza con la academia, el estado y el sector productivo, de tal manera que los resultados puedan ser implementados con la inclusión de la comunidad y articulado con los programas que ya se vienen desarrollando.

- Se recomienda al sector continuar aprovechando la estrategia de los mecanismos de desarrollo limpio que se han implementado con los cambios de tecnología en el proceso de cogeneración. Es importante hacer seguimiento a proyectos MDL que se culminan o están próximos a culminar, como es el caso del ingenio Providencia, que redujo el consumo de carbón como combustible auxiliar del bagazo de caña de azúcar con el uso como combustibles de los residuos de la cosecha de caña (bornojo), que normalmente se quemaban en campo.



## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

Con el desarrollo de este proyecto, se concluye que la propuesta planteada de incluir al ACV que evalúa la dimensión ambiental, la dimensión económica con el LCC y la dimensión social con un análisis de stakeholders, entrega una visión pertinente de la sustentabilidad de los procesos de aprovechamiento, permite reconocer las falencias que se encuentran en las respectivas dimensiones, pudiendo así constituirse en una herramienta de gestión eficaz y eficiente.

Con el diagnóstico realizado a cada una de las dimensiones de la sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, se identificó que el 85% del bagazo generado se utiliza en los procesos de cogeneración de energía y el 15% se utiliza para la producción de papel. Se analizaron cada uno de los aspectos ambientales que generan impactos en los dos procesos de aprovechamiento y se analizó información relevante para las dimensiones económica y social.

Se define, a través de la práctica, que con el uso de la metodología ACV propuesta por la ISO 14040 y el uso del software SIMAPRO, el ACV se consolida como una de las estrategias más precisas y eficaces para valorar los impactos ambientales generados en el ciclo de vida de un residuo o subproducto. En el caso del presente proyecto, la metodología fue precisa en el análisis del ciclo de vida del bagazo de caña de azúcar de la puerta a la puerta, en donde se evaluaron los impactos ambientales mediante seis categorías para las dos alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, dando como resultado que la producción de vapor en la caldera es el proceso unitario con más impactos en la alternativa de cogeneración de energía y que el blanqueamiento

de la pulpa es el proceso unitario con más impactos en la alternativa de producción de papel. Al identificar y valorar los impactos por procesos, se pueden proponer propuestas de mejora más precisas y pertinentes a cada aspecto ambiental.

Al incorporar al ACV (Dimensión Ambiental), el Análisis de Costos del Ciclo de Vida LCC (Dimensión económica) y el Análisis de Stakeholders (Dimensión social), se logró construir un indicador de sostenibilidad que calificó entre 0 y 1 cada una de las dimensiones de la sustentabilidad. Se obtuvo la calificación final, sumando las tres dimensiones, en donde la alternativa de cogeneración de energía obtuvo una calificación de 1.44 sobre 3, y la alternativa de producción de papel obtuvo una calificación de 1.88 sobre 3, siendo esta última la alternativa más sustentable. Pese a lo que consideran las autoridades del sector frente al aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, con los resultados de este estudio se evidencia la baja sustentabilidad que tiene el aprovechamiento de un residuo agrícola con gran contenido energético. Se hace necesario mejorar los procesos unitarios ambientalmente críticos, de la misma manera se debe mirar la posibilidad de nuevos usos que muestren mejores niveles de sustentabilidad en las dimensiones social y económica.

## **7.2 Recomendaciones**

La metodología propuesta en el presente trabajo, fue planteada para analizar las alternativas actuales del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, pero por sus características, puede utilizarse para analizar nuevas alternativas de aprovechamiento o utilizarse para analizar la sustentabilidad de procesos diferentes.

Debido a los bajos niveles de sustentabilidad obtenidos en las dimensiones ambiental y social, se sugiere aplicar la metodología para procesos de aprovechamiento del bagazo como la producción de etanol lignocelulósico, para la producción de bioplásticos y otros y compararlos con los procesos de aprovechamiento actuales, como herramienta de viabilidad.

Se recomienda que se investiguen técnicas específicas de análisis de ciclo de vida para cada uno de los ingenios de la región del Valle del Cauca y para Carvajal Pulpa y Papel, de tal manera que se pueda contar con una base de datos comparativa en el tiempo, que realmente los proyectos de valoración integral y que involucren el tema de biocombustibles.

Para nuevas investigaciones se sugiere desarrollar la metodología para el análisis de la dimensión social “*social life cycle assessment*” y compararla con el análisis de stakeholders que se desarrolló en el presente estudio.

Teniendo en cuenta los resultados del ACV, se recomienda a los ingenios enfocar la gestión hacia la minimización de los impactos en el proceso de la caldera y a Carvajal Pulpa y Papel enfocarse en el proceso de blanqueo.

Aunque los esfuerzos de los ingenios y Carvajal pulpa y papel por disminuir sus impactos ambientales han sido considerables, se debe seguir trabajando no sólo en el cumplimiento de la normatividad, sino en la búsqueda de ingresos económicos y sociales a partir de las mejoras ambientales.



**A. Anexo: Matriz de cálculo para el  
Análisis de Costos del Ciclo de Vida  
LCC para la cogeneración de energía**



**B. Anexo: Matriz de cálculo para el  
Análisis de Costos del Ciclo de Vida  
LCC para la producción de papel**



## Bibliografía

- Acevedo Pabón, P. A. (2012). *Herramienta de análisis de alternativas de producción incorporando el ACV "Cuna a cuna" a los métodos tradicionales. Comparación de biodiesel de palma de higuera*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Acevedo Pinzón, J. C. (2009). *Simulación de las unidades de cogeneración de energía a partir del bagazo de caña de azúcar*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Aguilar , N., Rodríguez, A., & Castillo, A. (2010). Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Virtualpro*, 1-29.
- Asocaña. (2002). *Guía Ambiental para el Cultivo de Caña de azúcar*. Cali: Asocaña, Ministerio de Medio Ambiente.
- Asocaña. (2009). *Informe anual 2008-2009*.
- Asocaña. (2010). *Guía ambiental para el subsector de la caña de azúcar*. Cali: ASOCAÑA.
- Asocaña. (2012). *¿Quiénes somos?* Recuperado el 8 de Agosto de 2015, de <http://www.asocana.org/publico/info.aspx>
- Asocaña. (Mayo de 2012). *Cogeneración*.
- Asocaña. (2012). *Historia del sector azucarero*. Recuperado el 5 de Agosto de 2015, de Asocaña: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=8>
- Asocaña. (2012). *Informe de Sostenibilidad*. Cali: Asocaña.
- Asocaña. (2013). *Informe anual 2012-2013*. Cali, Colombia: Asocaña.
- Asocaña. (2014). *Informe anual 2013-2014*. 2014: Asocaña.
- Asocaña. (2015). El sector Azucarero Colombiano, más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país. *Asocaña*, 1-7.

- Asocaña. (4 de 2016). *Balance azucarero colombiano ASOCAÑA 2000-2016*. Obtenido de [www.asocaña.com.co:  
http://www.asocana.com.co/modules/documentos/5528.aspx](http://www.asocana.com.co/modules/documentos/5528.aspx)
- Asocaña. (2016). *Reporte de sostenibilidad del sector azucarero colombiano 2015-2016*. Bogotá: Asocaña.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (22 de Septiembre de 2015). Certificación 0111-15. *Por la cual se certifica que son acreditables los elementos y equipos objeto de solicitud de exclusión de impuestos sobre las ventas IVA presentada por la empresa MAYAGUEZ S.A. y se toman otras determinaciones*. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA.
- Batres Lehnhoff, L. P. (2008). *Beneficios económicos de instalar una planta cogeneradora de energía en Guatemala*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.
- Bolaños, W. (1 de 9 de 2015). Entrevista Ingenios. (A. P. Becerra, Entrevistador)
- Buddadee, B., Wirojanagud, W., Watts, D., & Pitakaso, R. (2008). The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: a case study for Thailand. *Environ Impacto Evaluar Rev*, 380-391.
- Buitrago, A., & Pinto, P. (2015). *Determinación del indicador integrado de desarrollo sostenible y biograma para el aprovechamiento actual del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca*. Bogotá: Proyecto de grado para obtener el título de ingeniero ambiental, Universidad Santo Tomás.
- Cámara de comercio de Cali. (2014). *Enfoque competitivo unidad económica y de planeación*. Cali.
- Cardona, C., Quintero, J., & Paz, I. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 4754-4766.
- Carolina Martínez, E. V. (2004). *Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico, Diseño de una planta piloto para la producción de etanol a partir de bagazo de caña de azúcar*. Bucaramanga.
- Carson, R. (2010). *Primavera silenciosa: Clásicos de la ciencia y la tecnología*. Barcelona: Grupo Planeta .
- Carvajal Internacional S.A. (2010). *Informe anual*.
- Carvajal Pulpa y Papel. (2010). *Informe de sostenibilidad*.
- Carvajal Pulpa y Papel. (2011). *Informe anual programa de uso eficiente y ahorro del agua* . Yumbo, Valle del Cauca: Carvajal Pulpa y Papel.

- Carvajal Pulpa y Papel. (2011). *Informe de avances del convenio de reconversión a tecnología limpia CRTL, suscrito entre Carvajal Pulpa y Papel S.A. y la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC*. Yumbo, Valle del Cauca: Carvajal Pulpa y Papel.
- Carvajal Pulpa y Papel. (2014). *Informe de Sostenibilidad 2014*. Yumbo, Valle del Cauca: CARVAJAL PULPA Y PAPEL.
- Carvajal S.A. (2011). *Informe anual*.
- Carvajal S.A. (2011). *Informe de sostenibilidad*.
- Carvajal S.A. (2012). *Informe anual*.
- Carvajal S.A. (2012). *Informe de sostenibilidad*.
- Catalán, H. (2013). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 1-19.
- Cenicaña. (25 de Noviembre de 2015). [www.cenicaña.org](http://www.cenicaña.org). Obtenido de <http://www.cenicana.org/web/acerca-de/agroindustria/la-region-azucarera-de-colombia>
- Cerón , J. C., Cerón, H., & Cerón, C. A. (2014). Impacto del sector azucarero en el empleo en el Valle del Cauca. Un análisis a partir de los informes RSE basados en el modelo GRI. *Magazín Empresarial*, 45-53.
- Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). *Nuestro Futuro Común*. Madrid: Alianza editorial.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2012). *Informe de la calidad del aire 2011*. Santiago de Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.
- Correa JA, L. (2012). Depithers for Efficient Preparation of Sugar Cane Bagasse Fibers in Pulp and Paper Industry. *Scielo*, 417-424.
- Correa Restrepo , F., Vasco Ramírez, A., & Pérez Montoya, C. (2005). La curva medioambiental de Kuznets: Evidencia empírica para Colomba. *Semestre económico. Universidad de Medellín*, 1-18.
- DANE. (2005). *Censo general 2005 Valle del Cauca y Cali*. Bogotá.
- De Freitas Branco, R., Dos Santos, J., & da Silva, S. (2011). A novel use for sugarcane bagasse hemicellulosic fraction. *Biomass and Bioenergy*, 3241-3246.

- Delgado Ramos, G. C. (2011). Decrecimiento biofísico y desarrollo. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 1-11.
- Dhillon, B. (2010). *Life cycle costing for engineers*. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- Egeskong, A., Berndes, G., Freitas, F., Gustafsson, S., & Sparovek, G. (2011). Integrating bioenergy and food production - A case study of combined ethanol and dairy production in Pontal, Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 8-16.
- Embassy of The Federal Democratic Republic of Ethiopia in London. (3 de 08 de 2015). *Embassy of The Federal Democratic Republic of Ethiopia in London*. Obtenido de Embassy of The Federal Democratic Republic of Ethiopia in London: [http://www.ethioembassy.org.uk/trade\\_and\\_investment/Selected%20Investment%20Project%20Profiles/Manufacturing/Paper%20and%20Paper%20Products/Small%20Scale%20Paper%20Making.pdf](http://www.ethioembassy.org.uk/trade_and_investment/Selected%20Investment%20Project%20Profiles/Manufacturing/Paper%20and%20Paper%20Products/Small%20Scale%20Paper%20Making.pdf)
- Eschenhagen, M. L. (2006). Las cumbres ambientales internacionales y la educación ambiental. *OASIS. Centro de Investigaciones y Proyectos Especiales Universidad Externado*, 1-62.
- Fedesarrollo. (2010). *Impacto socioeconómico del sector azucarero colombiano en la economía nacional*.
- Fedesarrollo. (2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Franco, S., & Correa, S. (2009). *Los patrones de cambio tecnológico en la región El ingenio Risaralda S.A*. Pereira: Universidad Católica popular de Risaralda.
- Gallopín, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: Un enfoque sistémico*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Garcés Paz, R. V., & Martínez Silva, S. V. (2008). *Estudio del Poder Calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- García Romo, P. (2010). *Caracterización del agua recirculada y optimización de la dosificación de la lechada de cal en el agua residual del ingenio Risaralda S.A*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gil Unday, Z. (2011). *Estudio de impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernandez"*. Cuba: Universidad de Girona.

- Gomez Londoño, J. F. (2012). *Balance de materiales para la legislación del producto terminado en la empresa Carvajal Pulpa y Papel Zona Franca Permanente Especial*. Cali: Universidad Autónoma del Occidente.
- Gómez, J. F. (2012). *Balance de materiales para la legislación del producto terminado en la empresa Carvajal Pulpa y Papel, zona franca permanente especial*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- González Esteban, E. (2007). La teoría de los stakeholders: Un puente para el desarrollo práctico de la ética empresarial y de la responsabilidad social corporativa. *Veritas*, 205-224.
- Grillo Renó, M., Silva Lora, E., Escobar Palacios, J., Venturini, O., & Almazan, O. (2011). A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. *Energy*, 3716-3726.
- Gudynas, E. (2004). *Ecología, Economía y Ética del desarrollo sostenible*. Montevideo: Centro Latino Americano de Ecología Social y D3E.
- Guimaraes, R. (1999). Desarrollo sustentable: ¿Propuesta alternativa o retórica neoliberal? *Temas de ciencia y tecnología. Universidad Tecnológica de la Mixteca*, 31-47.
- Harrison, J. S., & John, C. H. (2002). *Fundamentos de la dirección estratégica*. Madrid: Editorial Paraninfo.
- ICONTEC. (2007). *Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida ISO 14040*. Bogotá: ICONTEC.
- Icontec. (2007). *ISO: 14040: 2007, Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Bogotá, Colombia: Icontec.
- IDEAM. (2012). *Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010 D.C*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Instituto Superior del Medio Ambiente. (2011). *Metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Herramientas de Software para ACV*. Madrid: Instituto Superior del Medio Ambiente.
- Isaacs, H. (2013). *Caracterización térmica de los equipos críticos de las área de calderas y pulpa de Carvajal Pulpa y Papel, Planta 2 basado en modelos de gestión integral (MGIE)*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Krick, T., Forstater, M., Monaghan, P., & Sillanpaa, M. (2006). *De las palabras a la acción: El compromiso con los stakeholders. Manual para la práctica de las*

- relaciones con los grupos de interés*. Canadá: United Nations Environment Programme UNEP.
- Leal, G. E. (2007). Debate sobre la sostenibilidad. *Maestría en Planeación Urbana y Regional*. Pontificia Universidad Javeriana, 1-13.
- Leff, E. (2002). *Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Leff, E. (2009). Pensamiento Ambiental Latinoamericano: Patrimonio de un saber para la sustentabilidad. *VI congreso Iberoamericano de Educación Ambiental*, 1-15.
- Liu, L. (2012). Environmental poverty, a decomposed environmental Kuznets curve, and alternatives: Sustainability lesson from China. *Ecological Economics*, 86-92.
- Loh, Y., Sujan, D., Rahman, M., & Das, C. (2013). Sugarcane bagasse- The future composite material: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 14-22.
- Luo, L., Van de Voet, E., & Huppes, G. (2009). Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renovar Sustain Energía Rev*, 1613-1619.
- Luo, L., Voet, E. V., & Huppes, G. (2008). Life Cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1613-1619.
- Luz, S., Caldeira-Pires, A., & Ferrao, P. (2010). Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. *Resources, Conservation and Recycling*, 1135-1144.
- Martinez Alier, J. (2004). Los conflictos ecológicos- distributivos y los indicadores de sustentabilidad. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* , 21-30.
- Mashoko, L., Mbohwa, C., & Thomas, V. (2013). Life cycle inventory of electricity cogeneration from bagasse in the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 42-49.
- Max-Neef, M., Elizalde, A., & Hopenhayn, M. (2010). *Desarrollo a escala humana: Opciones para el futuro*. Madrid: Biblioteca CF+S.
- Meadows, D., & Randers, J. (2004). *The limits to growth: The 30 - Year Update*. Chelsea: Green Publishing Co.

- Meza, J. C., Sigoillot, J.-C., Lomascolo, A., Navarro, D., & Auria, R. (2006). New process for fungal delignification of sugarcane bagasse and simultaneous production of laccase in a vapor phase bioreactor. *Agricultural and food chemistry*, 3852-3858.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.
- Moreno, J., Pozo, C., & Nájera, F. (2011). Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en la fabricación de bloques ecológicos para mampostería liviana. *Perfiles Facultad de ciencias ESPOCH*, 16-20.
- Mu, D., Seager, T., Rao, P., & Zhao, F. (2010). Comparative life cycle assessment of lignocellulosic ethanol production: biochemical versus thermochemical conversion. *Environ Administrar*, 565-578.
- Niederl, A., & Narodoslowsky, M. (2004). Life cycle assessment – study of biodiesel from tallow and used vegetable oil. *Institute of efficient resources and sustainable systems*, 721-739.
- Ojeda, K., Ávila, O., Suárez, J., & Kafarov, V. (2011). Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production—Part 1. *Chemical Engineering Research and Design*, 270-279.
- Ortiz Rivera, A. (2009). *Tratamiento por acidificación controlada de licor negro derivado del bagazo de caña para la recuperación de lignina y reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Pandey, A., Soccol, A., Nigam, P., & Soccol, V. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 69-80.
- Pearce, D., & Atkinson, G. (1998). The concept of sustainable development: An evaluation of its usefulness ten years after Brundtland. *Centre for social and economic research on the global environment. University College London*, 1-27.
- Petersen, A. M., Melamu, R., Knoetze, J. H., & Gorgens, J. F. (2014). Comparison of second-generation processes for the conversion of sugarcane bagasse to liquid biofuels in terms of energy efficiency, pinch point analysis and Life Cycle Analysis. *Energy Conversion and Management*, 292-301.
- Petersen, A., Melamu, R., Knoetze, J., & Gorgens, J. (2015). Comparison of second-generation processes for the conversion of sugarcane bagasse to liquid biofuels in terms of energy efficiency, pinch point analysis and Life Cycle Analysis. *Energy Conversion and Management*, 292-301.

- PNUD, Asocaña, Ministerio de Medio Ambiente, UPME. (2003). *Cogeneración en el sector azucarero aplicando el enfoque ESCO*. Bogotá: PNUD, ASOCAÑA, Ministerio de Medio Ambiente, UPME.
- Pré. (2015). *SimaPro Database Manual*. California: Pré.
- Proyungas, F. (2009). *Papel elaborado confiras alternativas provenientes de bagazo de caña de azúcar*. Fundación Proyungas.
- Reboratti, C. (2000). *Ambiente y sociedad: Conceptos y relaciones*. Buenos Aires: Ariel.
- Red Sauce. (1 de 2 de 2010). <http://Libros.redsauce.net/>. Obtenido de [files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/26CT.pdf](http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/26CT.pdf): <http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/26CT.pdf>
- Repositorio Universidad industrial de Santander . (2009). *Simulación de las unidades de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar*. Santander.
- Rethabile, M., & Blottnitz, H. (2011). 2nd Generation biofuels a sure bet? A life cycle assessment of how things could go wrong. *Journal of Cleaner Production*, 138-144.
- Rodríguez, J., Mañunga, T., & Cárdenas, C. (2012). Influencia de las fracciones de materia orgánica sobre el desempeño de un sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 447-455.
- Ronderos , C., & Palacios , L. (2010). *Aspectos económicos, sociales y ambientales de la industria de la caña de azúcar en Colombia*. Bogotá: Universidad Sergio Arboleda.
- Ronderos, C. (2011). *Responsabilidad social empresarial en la industria de la caña de azúcar en el Valle del río Cauca*. Universidad Sergio Arboleda .
- Sánchez, O. J., & Cardona, C. A. (2007). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. *Revista Universidad EAFIT*, 59-79.
- Sen, A. (2000). *Desarrollo y libertad*. Buenos Aires: GeoPlaneta.
- Senthil Kumaran, D. (2002). Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies. *Corporate Environmental Strategy*, 30-39.
- Soto Duque, A. (2015). *Estudio de los focos o fuentes de contaminación de los canales de agua lluvia en la empresa productora de Papeles Propal S.A. Planta II (Guachene - Cauca)*. Cali: Universidad Autónoma del Occidente.

- Upme . (2014). *Precios internos del carbón y coque* .
- UPME. (2003). *Potencialidades de los cultivos y residuos agrícolas en Colombia*. Bogotá: UPME.
- Valencia Botero, M. J., & Cardona Alzate, C. A. (2013). Evaluación ambiental para procesos que usan residuos de la industria de los biocombustibles como materias primas. *Revista EIA*, 103-110.
- Yoshioka, A., Gutiérrez, V., & Arango, S. (2011). *Análisis del ambiente competitivo del Cluster Bioindustrial del Azúcar en el valle geográfico del río Cauca*. Cali: Universidad Javeriana.
- Yunus, C. (2009). *Termodinámica*. New York: McGraw Hill.