

**HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN
INCORPORANDO EL ACV “CUNA A CUNA” A LOS MÉTODOS
TRADICIONALES. COMPARACIÓN DE BIODIESEL DE PALMA E HIGUERILLA.**

PAOLA ANDREA ACEVEDO PABÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
POSGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN
INCORPORANDO EL ACV “CUNA A CUNA” A LOS MÉTODOS
TRADICIONALES. COMPARACIÓN DE BIODIESEL DE PALMA E HIGUERILLA.**

PAOLA ANDREA ACEVEDO PABÓN

Tesis doctoral para optar por el título de
Doctor en Ingeniería Química

Director

Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov

Profesor Titular Universidad Industrial de Santander

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
POSGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

A mi padre “Leonardo Acevedo Duarte” por todo el amor y confianza que siempre ha depositado en mí. Por ser mi maestro, mi amigo, mi ejemplo y guiar cada uno de mis pasos.

AGRADECIMIENTOS

Primero deseo agradecer a mi director de tesis, el Profesor Kafarov, por su constante apoyo, amistad y confianza, lo cual me permitió desarrollar muchos aspectos de mi vida profesional en el área de la investigación.

Al Profesor Sam Mannan de la Universidad de Texas A&M en Estados Unidos, por haberme recibido y acogido tan gratamente durante mi pasantía de investigación en TAMU, por todos los espacios que me brindó para debatir ideas con los demás miembros del Mary Kay O' Connor Process Safety Center. Agradezco también a todos los compañeros de TAMU que me brindaron su amistad y asesoría durante ese tiempo.

A mis amigos de la UIS y UNIANDES en *College Station* por todo su apoyo, así como, a mis amigos y compañeros del Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía, y a quienes pertenecieron al Centro de Investigación en Simulación y Control de Procesos, por su amistad y colaboración.

También quiero expresar mi gratitud a los profesores de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, quienes han contribuido a mi formación académica; a los profesores Humberto Escalante y Mario Álvarez, por sus aportes para la versión final de esta tesis.

A COLCIENCIAS por el apoyo a los proyectos: “Desarrollo y validación de modelo de evaluación de producción con metodología del análisis de ciclo de vida de la cuna a la cuna” y “Comparación utilizando la metodología del análisis de ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y biodiesel obtenido de aceite de higuera”.

A mis amigas Carmen, Lucia y Liliana por levantarme el ánimo cada vez que lo necesité.

Finalmente, y no menos importante, quiero agradecer a mi familia por su apoyo constante.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. ESTADO DEL ARTE	28
1.1. ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE PROCESOS (ASP)	28
1.1.1. Antecedentes del ASP	29
1.1.2. Frentes de avance del ASP en general	34
1.1.3. ASP para producir biocombustibles	40
1.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN (EE)	44
1.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	50
1.3.1. Metodología del ACV	51
1.3.1.1. Definición de los objetivos y alcances del ACV	51
1.3.1.2. Análisis de inventario de ciclo de vida	53
1.3.1.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida	54
1.3.1.4. Interpretación del ACV	56
1.3.2. Frentes de avance del ACV en general y aplicado a biodiesel	57
1.4. INTEGRACIÓN ASP, EE y ACV	63
1.5. INTEGRACIÓN APLICADA A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	68
1.6. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO USANDO SCOPUS	71
2. PLANTEAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS	73
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS	73
2.2. MODELOS MATEMÁTICOS	80
2.2.1. Modelo de evaluación económica	81
2.2.2. Modelo de evaluación ambiental	85
2.2.3. Metodología de evaluación exergetica	87
2.2.4. Metodología AHP	93
2.3. EL EJEMPLO DE APLICACIÓN	94
3. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA	98

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA PRIMARIO.....	99
3.2. RECORRIDOS INICIALES EN LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS.....	101
3.2.1. Herramienta aplicada a producción de biodiesel con aceite de higuera .	102
3.2.2. Herramienta aplicada a planta de biodiesel a partir de aceite de palma ...	104
3.3. ANÁLISIS “PUERTA A PUERTA”	105
3.3.1. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: con metanol y NaOH (homogénea) como catalizador	106
3.3.2. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: con etanol y sulfato de zirconio como catalizador heterogéneo	127
3.3.3. Producción de biodiesel a partir de aceite de higuera: con metanol y NaOH como catalizador	131
3.4. EXPANSIÓN DEL SISTEMA.....	138
3.4.1. Inclusión de la producción del aceite crudo de palma	139
3.4.2. Inclusión del cultivo	142
3.4.3. Inclusión de la distribución y uso del biodiesel	144
3.5. ANÁLISIS “CUNA A CUNA”	145
3.5.1. Evaluación técnica, económica y ambiental de los escenarios	148
3.5.2. Asignación de pesos y selección de la mejor alternativa usando AHP	149
4. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	155
4.1. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA	155
4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA	158
5. CONCLUSIONES	162
6. RECOMENDACIONES.....	164
GLOSARIO	170
BIBLIOGRAFÍA	179
ANEXOS	203

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Integración metodologías ASP, EE y ACV.....	31
Figura 2. Componentes de la etapa de evaluación del impacto del ACV.	55
Figura 3. Esquema metodológico de herramienta de toma de decisiones con base en ASP, EE y ACV.	75
Figura 4. Evolución de los límites del sistema.	77
Figura 5. Esquema general de un proceso industrial.....	80
Figura 6. Esquema de un mezclador.	92
Figura 7. Estructura jerárquica para toma de decisiones.....	95
Figura 8. Flujo de información del modelo de evaluación.....	97
Figura 9. Diagrama de bloques: biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.	107
Figura 10. Simulación. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	109
Figura 11. Distribución de las irreversibilidades por etapas del proceso. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	113
Figura 12. Diagrama de Grassman. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	115
Figura 13. Comportamiento del precio de equilibrio del aceite crudo de palma con la TAM. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.....	121
Figura 14. Comportamiento del precio de equilibrio del biodiesel con la TAM. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	122
Figura 15. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador NaOH.....	125

Figura 16. Diagrama de bloques del proceso. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.	127
Figura 17. Diagrama de la simulación del Proceso. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.....	129
Figura 18. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta. Biodiesel a partir de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.....	131
Figura 19. Esquema del proceso. Biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.....	133
Figura 20. Simulación biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.....	135
Figura 21. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.....	138
Figura 22. Diagrama general de proceso de extractoras de aceite de palma en Colombia.....	140
Figura 23. Sistema cultivo.....	142
Figura 24. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10.	150
Figura 25. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10.....	150
Figura 26. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20.	151
Figura 27. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20.....	151
Figura 28. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100.	152
Figura 29. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100.....	152
Figura 30. Pirámide de responsabilidad social.	165

Figura 31. Pacto mundial de la ONU en responsabilidad social.167

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Algunas rutas posibles para producir biodiesel partiendo de aceites.....	44
Tabla 2. Expresiones para la evaluación de la eficiencia exergética de bombas, intercambiadores de calor y enfriadores.	91
Tabla 3. Esquema y expresiones para la eficiencia exergética de separadores, columnas de extracción y columnas de destilación.....	92
Tabla 4. Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento (Colombia 2012).	105
Tabla 5. Composición en peso del aceite de palma.....	106
Tabla 6. Información de las principales corrientes. Producción de biodiesel de aceite de palma con metano y NaOH como catalizador.	110
Tabla 7. Flujos de exergía de corrientes de potencia y calor. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador..	112
Tabla 8. Flujos de exergía de las principales corrientes. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	113
Tabla 9. Irreversibilidades y eficiencias en cada equipo proceso. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador...	114
Tabla 10. Lista de precios de equipos y valor del equipo fundamental. Producción de biodiesel de aceite palma con metanol y NaOH como catalizador....	116
Tabla 11. Valores de inversión. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como Catalizador. Planta de 80.000 t/año.....	117
Tabla 12 . Evaluación de CUMP para producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.....	118
Tabla 13. Evaluación de CUSI para producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.....	119
Tabla 14. Ingresos venta de los productos. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año. .	120
Tabla 15. Matriz de evaluación económica. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.	123

Tabla 16. Continuación evaluación económica.....	124
Tabla 17. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.....	126
Tabla 18. Características de algunas de las corrientes. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.	128
Tabla 19. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.	132
Tabla 20. Características de algunas de las corrientes. Biodiesel de aceite de higuierilla con metanol y NaOH como catalizador.....	135
Tabla 21. Evaluación de impacto ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de higuierilla con metanol y NaOH como catalizador.	137
Tabla 22. Balances de masa para la extractora de aceite de palma.....	140
Tabla 23. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta” de la extracción de aceite crudo de palma.....	141
Tabla 24. Evaluación de impacto del cultivo de palma en el Magdalena Medio. .	144
Tabla 25. Evaluación de impacto etapa de uso y distribución de biodiesel de palma obtenido con catálisis homogénea básica en mezclas: B10, B20 Y B100.	145
Tabla 26. Posibles escenarios con las etapas de vida analizadas.....	147
Tabla 27. Indicadores técnicos.	148
Tabla 28. Resultados de la evaluación ambiental de los escenarios con metodología “cuna a cuna”.	149
Tabla 29. Evaluación de escenarios y selección de la mejor alternativa.	154

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1	82
Ecuación 2	82
Ecuación 3	83
Ecuación 4	83
Ecuación 5	84
Ecuación 6	84
Ecuación 7	84
Ecuación 8	84
Ecuación 9	84
Ecuación 10	85
Ecuación 11	85
Ecuación 12	85
Ecuación 13	86
Ecuación 14	86
Ecuación 15	86
Ecuación 16	86
Ecuación 17	87
Ecuación 18	88
Ecuación 19	89
Ecuación 20	89
Ecuación 21	90
Ecuación 22	90
Ecuación 23	91
Ecuación 24	92
Ecuación 25	94
Ecuación 26	94
Ecuación 27	94

Ecuación 2894
Ecuación 29108
Ecuación 30119
Ecuación 31128
Ecuación 32128

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A EJERCICIO BIBLIOMÉTRICO CON SCOPUS.....	204
Anexo B EVALUACIONES ECONÓMICAS CASOS 2 Y 3.....	210
Anexo C FACTORES DE CARACTERIZACIÓN	212
Anexo D EVALUACIONES AMBIENTALES CON GWP ₁₀₀	215

TÍTULO: HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN INCORPORANDO EL ACV “CUNA A CUNA” A LOS MÉTODOS TRADICIONALES. COMPARACIÓN DE BIODIESEL DE PALMA E HIGUERILLA

AUTOR: PAOLA ANDREA ACEVEDO PABÓN**

PALABRAS CLAVES: Herramienta de análisis, cuna a cuna, biodiesel.

DESCRIPCIÓN:

En la presente tesis se desarrolló una herramienta de análisis que integra las metodologías análisis y síntesis de procesos (ASP) y evaluación económica de proyectos de inversión (EE), con análisis de ciclo de vida (ACV) “de la cuna a la cuna”. La herramienta desarrollada es aplicable a todo tipo de proceso y permite toma de decisiones de mayor complejidad que las metodologías propuestas. Además es flexible y funciona en escenarios multivariados.

Para mostrar la aplicabilidad de la herramienta, ésta se aplicó a la producción de biodiesel en escenarios colombianos y se dio respuesta a problemas específicos que sin la integración y la inclusión del paradigma “cuna a cuna” no hubiesen podido ser resueltos.

El paradigma “cuna a cuna” (“pozo a pozo” en el caso de combustibles) consiste en analizar todas y cada una de las etapas de la cadena productiva del bien o servicio sujeto a análisis; empezar y terminar en la misma etapa del ciclo de vida. Para cerrar la cadena productiva se incluyen como etapas adicionales los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza, que son los encargados de reabsorber, al menos en parte, las emisiones causadas en las etapas productivas.

Solo con el uso del paradigma “cuna a cuna” es posible evaluar de manera objetiva la producción de biocombustibles y unificar en parte los criterios de delimitación del sistema bajo estudio. Sin embargo, aún hace falta conocer mejor la dinámica de los ciclos biogeoquímicos para que los conceptos descritos en el presente trabajo puedan ser aplicados a cabalidad.

* Tesis de doctorado

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, Doctorado en Ingeniería Química, Director: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov.

TITLE: ANALYSIS TOOL FOR DECISION MAKING INTEGRATING “CRADLE TO CRADLE” LCA TO TRADITIONAL METHODOLOGIES. BIODIESEL FROM PALM AND CASTOR COMPARISSON.*

AUTHOR: PAOLA ANDREA ACEVEDO PABÓN**

KEYWORDS: Analysis tool, cradle to cradle, biodiesel.

DESCRIPTION:

In the present thesis, was developed, an analysis tool integrating process system engineering (PSE) and economic evaluation (EE) with “cradle to cradle” life cycle assessment (LCA). The tool is applicable to all type of processes and allows more complex decision making than the methodologies proposed until now. Besides, the tool is flexible and works with multiple scenarios.

In order to show the tool applicability, it was applied to biodiesel production in Colombian scenarios and it solves specific problems that were impossible to solve without the integration and the inclusion of “cradle to cradle” paradigm.

The “cradle to cradle” paradigm (“well to well” in fuels cases) consist in analyzing each one of the stages in the production chain of the good or service under analysis; begins and ends at the same life cycle stage. To close the productive chain the biogeochemical cycles of the nature must be included, because they are the responsible to absorb, at least in part, the emissions caused in the productive stages.

Only with the use of “cradle to cradle” paradigm, make objective assessments of biofuels and partially unify the criteria to delimit the system under study is possible. However, better understand of the dynamics of biogeochemical cycles is needed for the application of the concepts described in this research.

* Doctoral thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering, Scholl of Chemical Engineering. Ph.D. in Chemical Engineering. Director Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov.

INTRODUCCIÓN

En la investigación presentada en este documento, se desarrolló una herramienta de análisis de alternativas de producción que permite identificar las alternativas de obtención de un producto industrial y seleccionar aquellas con alta eficiencia en el tratamiento de materia y energía, rentables y ambientalmente sostenibles. Para ello se integran, con sinergias positivas, el análisis y síntesis de procesos (ASP) con análisis exergético, la evaluación económica (EE) y el análisis de ciclo de vida (ACV) con paradigma “de la cuna a la cuna”. El marco de aplicación y validación de la herramienta desarrollada es el análisis de alternativas de producción de biodiesel en Colombia.

JUSTIFICACIÓN

Justificación del desarrollo de la herramienta

En la evolución general de las herramientas de selección de procesos se parte de una situación inicial simple en la que: a) lo que se produce se vende en mercados protegidos; b) con disponibilidad abundante de recursos y servicios ambientales (algunos eran considerados infinitos y de valor cero); c) con única o pocas alternativas tecnológicas (con el supuesto de conocimiento o tecnología “constante”) y d) poca sensibilidad de las decisiones a los cambios de escenarios o reducido número de escenarios significativamente diferentes.

La situación se va complicando a lo largo del tiempo hasta que en la actualidad es prácticamente la opuesta en cuanto: i) mercado de compradores que exigen diversidad en mercados competidos y globales; ii) evidencia de agotamiento o por lo menos escasez de lo que hay y viene de la naturaleza; iii) crecimiento exponencial del conocimiento con “explosión combinatoria” de rutas de producción

y iv) gran sensibilidad de las decisiones al cambio de escenarios y explosión de escenarios que se deben tener en cuenta.

Entre el punto inicial y el actual se dan todas las combinaciones de los factores planteados y frente a ellas los instrumentos de toma de decisiones evolucionan con la siguiente secuencia:

1. Optimización (maximizar o minimizar) una función objetivo de eficiencia técnica con la restricción de rentabilidad,
2. La rentabilidad, soportada en eficiencia técnica, es el énfasis de la función objetivo,
3. Se liberan los dos supuestos de “tecnología constante” y de “recursos naturales infinitos”, así aumentan exponencialmente las alternativas y en la función objetivo se tienen restricciones de tipo ambiental,
4. Aparece la sostenibilidad ambiental como una nueva forma de las restricciones ambientales y se desarrollan herramientas de decisión con estrategias de optimización multivariable y multiobjetivo y procesos de análisis jerárquico¹;
5. Por la vía de la legislación y otros factores se va haciendo cada vez más perentoria y a la vez difícil la sostenibilidad, hasta convertirse en componente de la función objetivo;
6. Se avanza en el modelamiento de los fenómenos y procesos ambientales y de los intercambios entre lo natural y lo antrópico y se intenta desarrollar herramientas de decisión simultánea sobre lo ambiental, lo económico y lo técnico.

Paralelo a la evolución descrita aparecen desde etapas tempranas y avanzan el ASP y la EE, en etapas más recientes surge el ACV; como componentes

¹ Muy importante el apoyo de alta velocidad de operaciones matemáticas e informáticas y el perfeccionamiento del modelamiento y simulación.

importantes del estado del arte se destacan el análisis exergético en el ASP, el manejo de la incertidumbre en la EE y los intentos por incorporar el enfoque “de la cuna a la cuna” en el ACV.

La investigación se justifica, en primer lugar, por la necesidad de superar las dificultades y falencias de las herramientas hasta ahora conocidas, en cuanto no tienen aplicabilidad general a diversos productos y procesos en escenarios multivariados, no permiten decisiones complejas con diferentes grados de detalle y certeza de la información, no integran bien los criterios de eficiencia técnica y entre ellos el de eficiencia exergética, rentabilidad y favorabilidad ambiental y, no logran incluir la totalidad de las etapas del ciclo de vida del producto, “de la cuna a la tumba”.

Justificación de la aplicación

En la actualidad en Colombia se inició y se intensifica la producción y uso de combustibles alternativos que sustituyan al menos parcialmente los de origen fósil y entre ellos está el biodiesel a partir de aceite de palma africana. Se tomó la decisión con base en ASP y EE partiendo del supuesto de que los biocombustibles líquidos son preferibles ambientalmente a los derivados del petróleo.

Fueron datos de entrada, entre otros, el precio de mercado del aceite, la tecnología disponible, el precio regulado del biodiesel resultante y la normativa de utilizar una mezcla de 10% de biodiesel y 90% de diesel de petróleo, con crecientes porcentajes de biodiesel a través del tiempo.

El estado colombiano creó y mantiene una atmósfera de exenciones tributarias, subsidios y soportes financieros blandos, no solo para la esterificación del aceite sino también para los cultivos de la palma y en alguna medida, también para la

extracción del aceite, la mezcla del biodiesel con diesel de petróleo y para el transporte y distribución de la mezcla.

La producción y uso de biodiesel a partir de aceite de palma avanza en un escenario de cadenas oleoquímicas (en especial alrededor de aceite de palma) y del petróleo (en especial de producción de combustibles) desarrolladas y la primera en dinámico crecimiento en las diferentes etapas del ciclo de vida: cultivo, extracción de aceite, distribución en mercados interno y externo y uso como alimento.

Para destinar a cultivar palma diferentes áreas a lo largo y ancho del país se producen cambios del uso del suelo en una gran variedad de escenarios con diversidad de condiciones ecológicas, edafológicas y de conectividad con infraestructura vial y con los mercados. Todo esto genera preocupaciones por los impactos ambientales y por competir en particular con la seguridad alimentaria nacional o, en general con la producción de comida.

Diferentes universidades², corporaciones de investigación³ y hasta semilleros de investigación, en diferentes zonas del país, se ocupan, a posteriori de aplicar ASP, EE y ACV, independientemente o tratando de integrarlos a la producción de biodiesel en Colombia. En el frente del ASP se incluye el análisis exergético en esfuerzos que incluyen tesis doctorales.

Por su parte, en el frente del ACV se concentran inicialmente los esfuerzos en las etapas de producción y uso del biodiesel, pero las crecientes exigencias fuerzan a ampliar el marco de análisis y la complejidad de las herramientas.

² Se destaca entre otras la Universidad Industrial de Santander

³ Incluida CENIPALMA que es en Colombia el soporte científico y tecnológico del sector palmero.

Los agentes de toma de decisiones de los mercados potenciales, como la Unión Europea y los Estados Unidos adelantan también estudios y entre ellos de ACV que soportan directrices para decidir si compran biocombustibles a países como Colombia o Brasil. En el primer caso con énfasis en evaluación de los impactos ambientales (en especial de cambio climático) y específicamente de gases de efecto invernadero (GEI). En el segundo caso con un espectro mayor de criterios.

En Colombia se realizan los estudios correspondientes para demostrar que se cumplen las exigencias en determinados escenarios⁴. En las diferentes etapas del ciclo de vida del biodiesel de palma, en especial en plantas extractoras y de esterificación, se desarrollan y generalizan cambios tecnológicos de significativas disminuciones de impactos ambientales.

Lo descrito con respecto al aceite de palma y su cadena, se da también con respecto a otras materias primas oleaginosas sin que las correspondientes cadenas productivas estén desarrolladas y en particular sin que con esos insumos haya plantas de producción de biodiesel.

La higuera ha merecido especial atención por ser un cultivo de más generalizada posibilidad de cultivo en diferentes pisos térmicos y calidades de suelo disponibles en Colombia.

La explosión combinatoria de materias primas, tecnologías disponibles en las diferentes etapas (por ejemplo tipo de alcohol, tipo de catálisis y de catalizadores para la esterificación), terrenos para el cultivo, porcentaje de biodiesel en la mezcla con diesel de petróleo, distancia entre producción y mercados, entre

⁴ Los estudios en Europa parten de determinadas condiciones de cambio de uso del suelo y los de Colombia muestran que en Colombia se produce biodiesel y se espera producir más en el futuro, en otras condiciones de cambio de uso del suelo, para las que es favorable el balance de impacto ambiental y en especial de GEI. El EMPA, Universidad Pontificia Bolivariana y el centro nacional de producción más limpia y tecnologías ambientales de Colombia realizaron el estudio titulado "Estrategias de energía sostenible y biocombustibles para Colombia) para evaluar estos aspectos en los casos colombianos.

muchas otras variables, conducen a un amplio universo de posibilidades en el que se deben identificar las combinaciones más favorables.

La producción de biodiesel en Colombia es un problema que amerita y exige una metodología de selección de alternativas como la ya descrita.

La investigación se justifica, en consecuencia, también por la validación y aplicación de la metodología a un caso de importancia actual significativa en Colombia, como es la producción de biodiesel, sector estratégico para el país, en un escenario multivariado, complejo y cambiante y que corresponde a la búsqueda de energías renovables, sostenibles o amigables con el ambiente⁵.

HIPÓTESIS

Es posible integrar ACV con paradigma de la “de la cuna a la cuna”, al ASP con análisis exergético y a la EE, para desarrollar una herramienta de análisis mejorada que permita toma de decisiones de mayor complejidad, en escenarios multivariados y aplicable al caso colombiano de producción de biodiesel.

OBJETIVOS

El objetivo general fijado en la presente tesis es:

Desarrollar una herramienta de análisis de alternativas de proyectos industriales que integre ASP con análisis exergético, ACV “de la cuna a la cuna” y EE, y validarla aplicándola a la producción de biodiesel en escenarios colombianos.

Los objetivos específicos trazados para alcanzar el objetivo general son:

⁵ El norte del Centro de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible (CIDES) de la UIS.

- i. Integrar los modelos de ASP, EE y ACV en una herramienta de aplicación general, flexible y para decisiones que exigen la integración, en escenarios complejos y multivariados.
- ii. Incluir en la metodología la aplicación de ACV con diferentes enfoques hasta el de “cuna a cuna” involucrando las etapas de la naturaleza que cierran los ciclos.
- iii. Aplicar la herramienta desarrollada a la producción de biodiesel en escenarios colombianos para decisiones que exigen la integración antes referida y desarrollar los métodos respectivos.

PRESENTACIÓN DEL DOCUMENTO

El primer capítulo se ocupa del análisis del estado del arte de herramientas de toma de decisiones sobre alternativas de producción industrial que integren propósitos y criterios técnicos, ambientales y económicos. Se reconoce como parte de la frontera del conocimiento en el tema señalado la integración entre ASP, ACV y EE, las respectivas herramientas para toma de decisiones con cada uno de los énfasis planteados. Se muestra cómo, el análisis exergético cualifica al ASP y cómo la evolución del ACV de enfoques “puerta a puerta”⁶, a “cuna a puerta” y “puerta a cuna”, a “cuna a tumba”⁷ y finalmente a “cuna a cuna”, son avances y aportes significativos para mejorar las herramientas⁸.

⁶ “Puerta a Puerta”, como aparecerá claro en el desarrollo del documento, es una forma de traducir a la jerga del análisis ambiental, “dentro de los límites de las instalaciones industriales” o, más lacónicamente, “dentro de los límites de la fábrica o de la planta”.

⁷ Cuna y Tumba, como también aparecerá claro en el desarrollo del documento, significa llegar, en el ciclo de vida de un producto, hasta los orígenes en la naturaleza (cuna) de los insumos primarios y hasta los destinos en la naturaleza (tumba) de las descargas y residuos finales derivados de la producción, distribución y uso del producto.

“Cuna a Cuna” significa que se incluyen los procesos biogeoquímicos involucrados en el ACV de un producto.

⁸ El investigador cubano de la Universidad de Santa Clara, Erenio González Suárez, considera que el ACV es el capítulo y componente que le falta al clásico libro de Peters *et al.* 2002, para cualificarlo.

En segundo lugar, se revisa el estado del arte del desarrollo y aplicación de herramientas para decidir sobre producción de biodiesel, incluyendo la revisión de la frontera del conocimiento sobre alternativas tecnológicas para ello.

En tercer lugar se identifican los factores técnicos, económicos y ecológicos de la producción de biodiesel en Colombia así como sus combinaciones o escenarios para la toma de decisiones.

El segundo capítulo se destina a desarrollar, proponer y describir la herramienta objeto de la tesis, en términos de diagramas conceptuales, etapas secuenciales y modelos matemáticos. Se hace énfasis en los pasos y ventajas que significan un claro aporte al estado del arte, destacando en ellos los derivados de la integración ASP, EE y ACV, la inclusión del análisis exergético, el enfoque “cuna a cuna”, y el manejo de la incertidumbre.

En el **tercer capítulo** se aplica la herramienta al problema escogido como ejemplo: la producción de biodiesel en Colombia y en especial con aceites de palma y de higuera, que son las materias primas que se seleccionan durante las primeras iteraciones de análisis de alternativas. Se considera muy importante, incluso como aporte novedoso la identificación y definición de los escenarios que rodean el problema primario de producir biodiesel en Colombia.

La aplicación de la metodología lleva a identificar como preferible precisamente el escenario que en la práctica se ha seleccionado en Colombia, a lo largo de las etapas del ciclo de vida de producir biodiesel y esta correspondencia constituye una validación de la herramienta en el ejemplo escogido.

El cuarto capítulo se destina al análisis de la herramienta para mostrar la flexibilidad y generalidad de su aplicación y las ventajas sobre las preexistentes. También al análisis de la aplicación de la herramienta.

El capítulo quinto y sexto corresponde a las conclusiones y recomendaciones, concentradas éstas últimas en la forma y procesos productivos o productos a los cuales ampliar la aplicación de la metodología y en las rutas de ulteriores desarrollos y aportes para nuevos desplazamientos de la frontera del conocimiento.

En anexos se consignan: A los resultados de un ejercicio de medición bibliométrica de la novedad de la herramienta y de la visibilidad de la producción intelectual derivada de la misma, con énfasis en SCOPUS, B presentación de información y resultados complementarios sobre casos de estudio de la validación de la herramienta, C los factores de caracterización empleados en la evaluación de impacto del ACV y D los resultados de las evaluaciones ambientales usando GWP₁₀₀.

EL CARÁCTER DE INTERDISCIPLINARIO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación presentada tiene componentes de integración interdisciplinaria de la ingeniería química con campos de la economía y de la ecología alrededor de integrar con sinergias positivas los balances y análisis de flujos de masa y energía, económico – financieros y de impacto ambiental.

1. ESTADO DEL ARTE

Se aborda el análisis del estado del arte para los diferentes frentes de desarrollo científico y tecnológico involucrados en los objetivos e hipótesis de la investigación. Se examina primero el análisis y síntesis de procesos (ASP), que como metodología de toma de decisiones que integra el diseño de procesos con la evaluación de proyectos de inversión (EE) (numeral 1.1.). Se pasa luego a considerar algunos aspectos especiales de la EE y a la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) (numerales 1.2 y 1.3) y posteriormente al frente de la forma en que se han integrado, resaltando la utilidad encontrada cuando se realiza dicha integración, que constituye un avance en el estado del arte de cada componente (numeral 1.4). Lo antes descrito se adelanta haciendo referencia a un contexto de aplicación general a cualquier producto, centrando la atención en el biodiesel como producto específico. El análisis del estado del arte se termina con lo correspondiente a la aplicación de las tres metodologías ya integradas a escenarios de producción de biodiesel (numeral 1.5).

Como indicador de la novedad o consolidación de las temáticas en análisis, en el numeral 1.6 se recurre a un ejercicio de medición bibliométrica usando el buscador internacional SCOPUS y se concluye que el tema de la presente investigación está tanto en la cresta del interés actual y reciente, como en una naciente ola de la novedad.

1.1. ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE PROCESOS (ASP)

El ASP es uno de los campos de la ingeniería química cuyo estado del arte repercute de manera rápida, hoy día casi inmediata, en los planes de estudio de la disciplina profesional que lo incorporó como uno de los cursos formales desde el pregrado.

Es tema de textos de uso generalizado en el mundo (Rudd y Watson 1968, Peters *et al.* 2002, Himmelblau y Bischoff 2004) que se van actualizando en sucesivas ediciones que van adoptando los sucesivos avances del tema en general, ilustrados con ejemplos de aplicación a casos particulares para los que también se involucran los avances más recientes.

1.1.1. Antecedentes del ASP

El ASP es una metodología de toma de decisiones asociada desde el punto de vista técnico al diseño de procesos, y con diferente frecuencia, al control y a la optimización de procesos. Desde el punto de vista económico, se asocia a la evaluación de proyectos de inversión presuponiendo la integración de los balances y flujos de masa y energía, con los correspondientes de fondos financieros.

Como instrumento de toma de decisiones el ASP se puede resumir en cuatro pasos principales⁹ (ver figura 1 a): i) planteamiento del problema primario como necesidad de producir algo, demandado por algún mercado, en un determinado contexto de disponibilidad de materias primas, de energía y de otros insumos o recursos, ii) planteamiento y selección de problemas secundarios como alternativas de solucionar el primario, o bien como variantes de producción de lo que se necesita, iii) análisis de alternativas seleccionadas y iv) evaluación como aplicación de criterios para decisión sobre las alternativas.

Los cuatro pasos son secuenciales, les corresponden diferentes decisiones y puede haber retroalimentación entre ellos, lo que implica la iteración de algunos de ellos. A la vez que se itera, los grados de complejidad van creciendo debido a: datos, información y conocimiento cada vez más detallados y profundos.

⁹Se privilegia el enfoque de Rudd y Watson a, por ejemplo, el de Douglas. La figura 1 y sus componentes es un diagrama conceptual en el que se identifican los frentes de avance del estado del arte.

Así mismo se van aplicando métodos cada vez más rigurosos en los diferentes frentes de análisis. Los tipos de datos, información y conocimiento son los consignados en la figura 1 b y los grados de complejidad son los registrados en la figura 1c, para cada tipo de conocimiento.

La decisión asociada a los niveles de menor complejidad se resume en continuar o no con el estudio del proyecto en cuestión. Cuando se decide pasar a los niveles de complejidad mayor hay que asumir a la vez los fuertes incrementos de costos que ello implica; la decisión final se puede definir en términos generales en pasar del proyecto a la conversión del mismo en una realidad industrial y comercial que termina con la producción y comercialización de un producto o conjunto de productos.

Se trata de una evolución de las decisiones que no solo se refiere a la de los proyectos de inversión sino también a los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico; en efecto cuando se encuentran bien constituidas las cadenas de valor conocimiento – aplicación industrial, la evaluación de las esperadas o probables eficiencia técnica, rentabilidad y sostenibilidad, orientan a donde encaminar los esfuerzos en las etapas de gestión del conocimiento¹⁰ y por tanto a cómo privilegiar los destinos de recursos siempre escasos.

En la figura 1 se anticipa ya la integración del ASP con la EE y con el ACV como metodologías que soportan decisiones. Desde el punto de vista técnico ingenieril, el ASP considera las tecnologías disponibles con énfasis en las posibles rutas de obtención de productos, las alternativas de materias primas, requerimientos de energía, entre otros aspectos. Posteriormente cada combinación de posibilidades y de variables de proceso es sometida a balances de masa y energía que son tenidos en cuenta para la evaluación con criterios técnicos.

¹⁰ Como ilustración se puede examinar un muy buen ejemplo de enlace de decisiones en los mundos de la economía y del conocimiento para el caso de la industria del petróleo (Álvarez Cifuentes 2012).

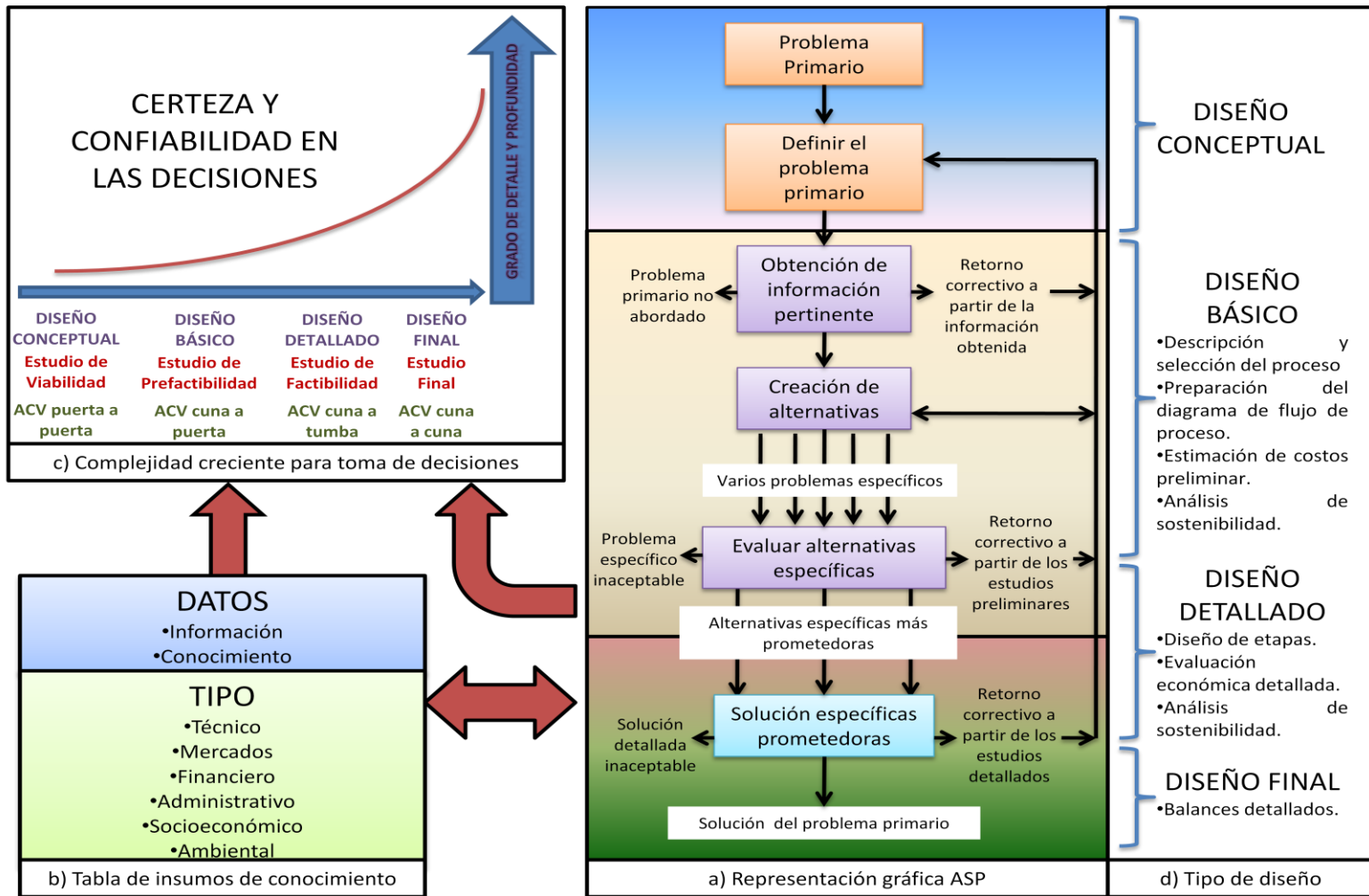


Figura 1. Integración metodologías ASP, EE y ACV.

Fuente: La Autora

Se concreta en diseño de procesos de creciente complejidad, como se representa en la figura 1d (Rudd y Watson 1968, Peters *et al.* 2002).

En una primera instancia, para la identificación y selección preliminar de las rutas o alternativas de obtención de un determinado producto¹¹ se recurre a la elaboración de diagramas de flujo muy generales. Esta etapa se conoce como selección técnica de alternativas y en ella, con criterios de escala adecuada, no inferioridad tecnológica y eficiencias másicas y energéticas globales, se define si vale la pena realizar el diseño del proceso con algunas de las alternativas que se identifican como potencialmente favorables y se descartan aquellos procesos que definitivamente no lo son.

Como segundo filtro técnico de selección se realiza el diseño preliminar. Este consiste en realizar balances de masa y energía, así como, diseñar los equipos principales (equipo fundamental) de las alternativas que asomaron buenos resultados. Con esta información es posible entonces identificar la ruta más viable y se procede a realizar el diseño detallado.

En el diseño detallado se incluyen los diseños de los sistemas de intercambio de calor, tratamiento de residuos y de producción de servicios industriales. Se realiza la integración energética del proceso y se procede a realizar la optimización de la planta. Los equipos son diseñados en detalle y los sistemas de control de proceso son detallados para medir la eficiencia exergética, la seguridad y realizar el correspondiente HAZOP análisis.

¹¹ Vale la pena insistir en que las alternativas que se someten a comparación (identificación) pueden tener diferente grado de avance (laboratorio de investigación, piloto a escala de investigación tecnológica, piloto a escala de prueba del mercado, planta industrial y en este caso, desde tecnologías patentadas y como ensayo hasta las maduras y sin restricciones de propiedad industrial). El nivel o estado de desarrollo de la tecnología suele ser uno de los criterios de selección y/o una de las variables consideradas en las combinaciones de alternativas.

Al diseño detallado del proceso se suelen hacer ajustes finales y añadir programas detallados de construcción, montaje y puesta en marcha de las instalaciones, con los correspondientes programas logísticos, PERT y CPM. Una vez se agregan estos detalles se obtiene el diseño final.

Con el frente económico financiero, dentro del ASP ocurre algo similar a lo descrito desde el punto de vista técnico, en cuanto al creciente detalle del análisis de las posibilidades de éxito de alternativas de producir y distribuir un determinado bien o servicio industrial.

En la selección preliminar de alternativas, con consideraciones de mercado se llega a fijar tamaños de planta y a estudiar los comportamientos de los precios de los insumos y productos para establecer un flujo de fondos aproximado que permita identificar si el proyecto puede ser rentable y con cuales alternativas; este nivel corresponde a estudios de viabilidad (se concluye con las alternativas viables) (ver figura 1. c).

Con las alternativas viables se estima la inversión necesaria para el montaje de la planta y se realiza el análisis de flujo de fondos para evaluar aspectos económicos como: valor presente neto en el último año de vida del proyecto, tiempo de recuperación de la inversión, tasa interna de retorno, entre otros. El nivel de detalle corresponde primero a estudios de pre factibilidad y luego a estudios de factibilidad (figura 1.c).

Con información de mercados, socioeconómica y financiera más completa, asociada al diseño detallado o al diseño final, con la mejor ruta o alternativa de proceso se llega a la evaluación final. Téngase en cuenta que en todos los pasos hay evaluación y que los criterios son económico – financieros.

Por último se realiza nuevamente un cálculo de la inversión pero contando ya con información detallada; se detallan aspectos de operación y se calculan los costos de operación. Se incluyen análisis particulares, dependiendo de los agentes económicos interesados en la implementación del proyecto, para decidir sobre cuál es la mejor forma de financiar y desarrollar los pasos para la construcción de la planta industrial. Se estiman tiempos de construcción y se realizan estudios de métodos y tiempos para cuantificar aspectos económicos adicionales.

1.1.2. Frentes de avance del ASP en general

El estado del arte del ASP tiene muy numerosos frentes de avance pero se destacan algunos de importancia particular por la relación con los propósitos de la presente investigación, todos relacionados entre sí en especial en cuanto a las sinergias positivas cruzadas de los avances.

En primera instancia trabajos referentes a instrumentos y enfoques de la integración másica y energética. En este frente, se han desarrollado estrategias de síntesis de procesos para obtener rutas de obtención que utilicen corrientes de residuos y productos intermedios para equilibrar la demanda de calor. Un ejemplo es Gassner y Maréchal 2010, quienes desarrollaron una estrategia de síntesis de procesos que consiste en descomponer el problema de diseño en modelos unitarios no lineales, cuyos balances másicos y energéticos son usados como restricciones en una programación lineal mixta, cuyo objetivo es maximizar la producción de gas natural sintético.

Romeo *et al.* 2011, por su parte, aplicaron los conceptos de integración másica y energética para combinar e integrar a escala industrial una planta generadora de energía eléctrica, una cementera y un sistema de captura de CO₂. De esta manera ya no solo se centra la atención en un proceso productivo, sino que se integra industrias de diferentes sectores con el objetivo de administrar mejor los recursos.

Gracias a la versatilidad de las metodologías y estrategias para realizar integración másica y energética, sus conceptos se han podido llevar a diversos sectores, escalas e incluso, es una herramienta que direcciona el proceso de diseño hacia plantas con buenos rendimientos técnicos, económicos y ambientales. Palacios-Bereche *et al.* 2011, consigna un estudio diagnóstico de las alternativas para producir etanol a partir de bagazo de caña. Valiéndose de simulaciones elaboradas con el software ASPEN PLUS® se obtuvieron los balances másicos y energéticos, realizaron la integración másica y energética, así como, el análisis “pinch” de las alternativas para visualizar cuál tenía mejor potencial.

Un ejemplo aplicado de la utilización de la integración másica y energética para toma de decisiones es el trabajo Giugliano *et al.* 2011, donde se comparan estrategias de recuperación másica y energética de residuos municipales en Italia.

Un segundo frente de avances del ASP es el referente a los modos de proceder ante situaciones de incertidumbre técnica¹² y van encaminados a analizar casos cada vez más complejos, usando estrategias matemáticas clásicas, o alternativas como las relacionadas con matemática fuzzy.

Las fuentes de incertidumbre del ASP como herramienta de toma decisiones son múltiples y variadas sus clasificaciones, por lo que es útil la comparación de la importancia relativa de los diferentes tipos. Papadokonstantakis *et al.* 2008, encontraron que, en las primeras etapas de diseño, es mayor la incertidumbre que surge de la definición de indicadores y de la imprecisión de los datos, que la generada en la asignación de pesos a los criterios de evaluación.

¹² La incertidumbre relacionada con aspectos económicos y de mercados se analiza en el aparte que aborda la Evaluación Económica.

Wechsung *et al.* 2009, propusieron un modelo para cuantificar el efecto de la incertidumbre en el diseño de procesos, que mejora la comparación entre diferentes alternativas, ante situaciones de no convergencia de los procesos de simulación basados en análisis numérico. El modelo identifica, en primer lugar, cuándo la no convergencia se debe a que la simulación toma raíces o soluciones de ecuaciones que no tienen significado físico (valores de masa negativos o raíces complejas, a título de ejemplo) y descarta o supera esas vías de simulación. En segundo lugar, cuando la no convergencia se da por motivos numéricos, identifica y solicita más información o detalle sobre las alternativas de diseño, información que al ser incluida en el modelo lleva a la convergencia.

Muy interesante es el aporte de Tao *et al.* 2010, que propusieron y probaron con un buen número de productos, un método de análisis de sensibilidad ante incertidumbre sobre condiciones y parámetros de procesos alternativos en comparación, orientado a entender y cuantificar el impacto de cambios de las variables inciertas sobre las funciones objetivo o resultados deseables. Con base en ello se seleccionan las variables de proceso que se deben controlar y cómo hacerlo para disminuir la incertidumbre.

Un caso frecuente es la búsqueda de respuestas y métodos para manejar la incertidumbre en problemas específicos que involucran materias primas estacionales. Al respecto, Benavides *et al.* 2011, proponen realizar simulaciones estocásticas de los procesos que tienen en cuenta la aleatoriedad de las variables inciertas. En su trabajo analizaron el caso de producción de biodiesel por transesterificación de aceites cuando estos provienen de materias primas estacionales, las cuales deben ser transportadas y almacenadas con el fin de mantener una producción continua. El modelo desarrollado por los autores permite identificar la configuración óptima del proceso dependiendo del tamaño de los mercados, distancias y disponibilidad de materias primas.

También se cuenta con referencias recientes que usan métodos tradicionales de análisis de incertidumbre para analizar datos experimentales y parámetros necesarios para iniciar el proceso de diseño. Por ejemplo, Hajipour y Satyro 2011, crearon un modelo para estimar la temperatura crítica y la presión crítica de hidrocarburos C5-C36, teniendo en cuenta la incertidumbre de los datos experimentales y parámetros de correlación.

Un tercer frente de avance permanente del ASP es el de los procesadores: el estado del arte de herramientas de simulación y estrategias de modelamiento se mueve con gran velocidad. Es común encontrar trabajos como el de Hernández *et al.* 2011, donde se enfoca el proceso de diseño con la retroalimentación que se da entre la simulación de procesos y la metodología de superficie de respuesta. Este enfoque es particularmente útil en etapas iniciales del ASP puesto que permite diagnosticar rutas e identificar las variables que afectan en mayor proporción el proceso y se les debe hacer posteriormente un análisis de sensibilidad. A escala industrial este enfoque tiene como ventaja poder tomar decisiones valiéndose de un esfuerzo computacional razonable que permite tener un modelo reducido que tiene identificados los factores más relevantes. Es una forma de manejo y disminución de la incertidumbre a la que se hizo referencia en párrafos precedentes.

La simulación de procesos permite abordar muchos problemas de diseño con costos muy reducidos. Actualmente se usa tanto en aulas de clase como en firmas de ingeniería (Wohlmuth 2011). Por otra parte, actualmente en el mercado se cuenta con software que analizan incluso fenómenos moleculares y atómicos, lo cual ha permitido el desarrollo de nuevos materiales (Lee *et al.* 2011).

Como un cuarto frente de avance del ASP, aparte de las simulaciones como herramientas informáticas para soportar el proceso de diseño, se han desarrollado metodologías que analizan bases de datos y sistemas de información históricos de

diversas industrias para soportar toma de decisiones frente a problemas específicos de diversa índole. Chen y Yang 2011, analizaron la sensibilidad de modelos de procesos no lineales elaborados a partir de bases de datos para estudiar el impacto de las variables de proceso en las variables de respuesta de dichos modelos.

Por su parte, Choudhary *et al.* 2009, realzan la creciente importancia de crear de bases de datos que contengan información proveniente de la industria. Dentro de las actividades que se pueden realizar con estas bases de datos se destacan la caracterización y descripción, asociación, clasificación, predicción, clustering y evolución de los ASP.

Incluso, se han propuesto sistemas para diseñar procesos basándose en una gran cantidad de información empírica. Los sistema de diseño incluyen módulos de entrada y salida, módulos de conocimiento proveniente de bases de datos y módulos de diseño de procesos. Estos sistemas realizan ajustes inteligentes aplicando la teoría fuzzy y redes neuronales (Gao *et al.* 2009).

Del estado del arte de nueva información y sistemas de información se destaca la elaboración de algoritmos para soportar toma de decisiones, basado en análisis multicriterio y son muy numerosas las referencias recientes al respecto; en un caso de este tipo Damiano *et al.* 2010 involucra el manejo y planeación del uso de la energía empleando funciones desarrolladas a partir de sistemas de información geográfica, las cuales permiten un manejo matemático relativamente simple a la hora de incluir aspectos sociales, económicos, ambientales, de condiciones para el transporte.

También se han desarrollado modelos de gestión de calidad de datos para diseño (He y Chang 2010) y métodos para el modelado de procesos basado en sistemas

de información y de conocimiento holístico, incluyendo su aplicación a procesos, control de procesos y gestión del conocimiento (Zhong *et al.* 2011).

El quinto frente de avance del ASP que se consideró de importancia alta en el contexto de la presente investigación es el relacionado con cada vez más procesos, operaciones unitarias o tipos de equipos que se pueden incluir en el proceso en análisis y con los que el nivel de complejidad de toma de decisiones aumenta.

Las variantes en el ASP de biocombustibles van desde bioprocesos, como el que se ilustra en Xu *et al.* 2012 (proceso para producir biodiesel que incluye un reactor de lecho empacado con lipasa inmovilizada), hasta propuestas novedosas (por ejemplo, trabajos como el de Hingu *et al.* 2010 que proponen el uso de reactores sonoquímicos para la síntesis de biodiesel de aceites usados, incluyen el estudio del efecto de parámetros de operación como: relación alcohol-aceite, concentración del catalizador, temperatura, potencia y pulso).

Como ejemplo de nuevos equipos está el trabajo de Ko *et al.* 2012. Ellos diseñaron un sistema industrial de producción de biodiesel que usa enzimas para catalizar la reacción y está constituido por un bioreactor de membrana que remueve el glicerol y dosifica el metanol de forma continua para evitar la desactivación de las enzimas.

Por otra parte, a medida que se van inventando, escalando y probando a nivel piloto los nuevos equipos y procesos, va aumentando su madurez tecnológica. Si los resultados obtenidos en todas las etapas son prometedores, se llega hasta el uso de estas tecnologías con escala igual a la del tamaño del problema.

Entra así en el ASP el proceso de escalado que puede variar sustancialmente de equipo a equipo y de proceso a proceso.

Willoughby 2006, hace un recuento de las técnicas de escalado hacia tamaño industrial y viceversa. Dentro de su trabajo propone usar modelos matemáticos para predecir el comportamiento de los sistemas con el escalado. La clave según es lograr determinar cuáles son los parámetros o propiedades que dominan el sistema o unidad de proceso, si esto se consigue el número de experimentos y costos disminuye drásticamente.

Wei 2010, resalta que el uso de simuladores, modelos matemáticos y software son indispensables para resolver problemas específicos para el escalado y diseño de nuevos procesos.

Una conclusión clara del presente apartado, es que el estado del arte del ASP es de turbulenta y creciente movilidad.

1.1.3. ASP para producir biocombustibles

Las citas del párrafo anterior, además de referirse a avances generales del ASP incluyen avances relacionados con ASP de biocombustibles; no obstante es pertinente ampliar lo relacionado con ampliación de alternativas de materias primas y de rutas tecnológicas para producir biocombustibles, muy en consonancia con el quinto frente de avance del ASP, destacado en el numeral anterior.

El biodiesel puede ser obtenido partiendo de un gran número de aceites vegetales y grasas animales. Dependiendo de la materia prima los biodiesel se clasifican en: de primera, segunda y tercera generación; los de primera generación son los provenientes de aceites y grasas animales, los de segunda los elaborados a partir de residuos agrícolas.

Partiendo de aceites vegetales muchos trabajos se han orientado al desarrollo de bioprocesos para la producción de biodiesel. Los esfuerzos en este frente se centran en desarrollar lipasas específicas para cada aceite y que ayuden a mejorar la transformación y el aprovechamiento de los subproductos de las reacciones. Verdugo *et al.* 2011, desarrollaron una lipasa específica para catalizar la producción de biodiesel. La ventaja de esta lipasa frente a las demás es que el glicerol es integrado como monoacilgliceroles en la composición del biodiesel, evitando que se tenga que hacer el proceso de separación.

Un ejemplo del uso de residuos agrícolas para la producción de biodiesel es el trabajo Guimaraes *et al.* 2012, dentro del cual se discuten de manera simultánea aspectos sociales, ambientales y económicos de producir biodiesel de sebo vacuno.

La mayoría de trabajos referentes al biodiesel de tercera generación son de microalgas. Sin embargo los procedentes de nuevas oleaginosas también son considerados como de tercera generación.

La razón por la que la mayoría de los esfuerzos se centran en las microalgas es porque autores como, Ahmad *et al.* 2011, sostienen que el biodiesel de microalgas es el único que puede ser producido de manera sostenible en el futuro. Una referencia reciente del estado del arte del biodiesel de microalgas es Brunet *et al.* 2012, quienes evalúan desde el punto de vista económico, técnico y ambiental la producción de biodiesel de microalgas. Cabe mencionar que hasta el momento las microalgas no se han podido producir a escala industrial para obtener biodiesel de una manera económicamente viable. Existen muchos inconvenientes técnicos sin resolver que imposibilitan su uso a escala industrial.

Paralelo a la solución de los inconvenientes con las microalgas y oleaginosas, se exploran nuevas fuentes de materias primas para producir biodiesel. Sathya

Selvabala *et al.* 2011, desarrollaron un proceso de dos etapas para producir biodiesel de aceite de *calophyllum inophyllum*. El pretratamiento consta de una esterificación ácida que usa ácido fosfórico modificado β zeolita, y le sigue una transesterificación básica con hidróxido de sodio como catalizador.

En estudios recientes también se exploran microorganismos para producir biodiesel. Galafassi *et al.* 2012, proponen el uso de lípidos de microorganismos como una alternativa competitiva dados los altos costos de los aceites vegetales.

Las tecnologías para transformar aceites y grasas en biodiesel son cada vez más y de diversa índole; numerosos trabajos han sido elaborados para proponer rutas de obtención bajo condiciones súper críticas sin que se haya conseguido llevar a escala industrial alguno de estos procesos por sus altos costos y consumos energéticos (Quesada-Medina y Olivares-Carrillo 2011).

Las conversiones óptimas de procesos a condiciones supercríticas son: con el metanol al 81.5% y con el etanol la óptima posible es 79,2% (Tan *et al.* 2010).

Con el objeto de superar las limitaciones de los procesos supercríticos se contemplan nuevas alternativas, como la consignada en Ching-Hung *et al.* 2010. En este trabajo un proceso para producir biodiesel de 98,5% de pureza fue desarrollado. El proceso consta de una extracción supercrítica con dióxido de carbono de triglicéridos de jatrofa, seguido de una hidrólisis subcrítica y metilación supercrítica del aceite extraído con dióxido de carbono.

Como se había mencionado anteriormente, varios bioprocesos también han sido propuestos pero hasta la fecha no han encontrado aplicación industrial. Gog *et al.* 2012, indica las variables claves de operación para la producción de biodiesel usando lipasas y propone algunas soluciones tecnológicas para los problemas de

altos costos de las lipasas, la baja conversión y la inactivación de las lipasas causada por el glicerol y el metanol.

Inicialmente los componentes biológicos fueron propuestos como parte del proceso global de producción del biodiesel, es decir, como complemento de los tratamientos químicos (Wei-Jia *et al.* 2008, desarrollaron un proceso enzimático y con catálisis ácida combinada para producir biodiesel a partir de aceite de soya), pero trabajos recientes como el de Sotoft *et al.* 2010, quienes luego de simular y evaluar económicamente la producción de biodiesel enzimática, encontraron que para que los procesos enzimáticos sean viables solo hace falta que los precios de las lipasas se reduzcan. Además también mencionan que esto puede ocurrir en un futuro cercano.

Las nuevas propuestas para producir biodiesel, constan de procesos que incluyen extracción y destilación reactiva. Todas estas alternativas son recientes y aún se encuentran en etapa de desarrollo conceptual.

En la literatura se encuentran rutas de obtención que hasta el momento solo han sido probadas a escala de laboratorio como el trabajo de Dussan *et al.* 2010, quienes prepararon nano partículas magnéticas precipitando iones $Fe(2+)$ y $Fe(3+)$ en una solución de hidróxido de sodio que posteriormente fueron soportadas en lipasas. Una vez las partículas fueron soportadas en la lipasa se usaron como catalizador en una extracción reactiva de aceites vegetales para producir biodiesel. Con la información obtenida a escala de laboratorio, se realizaron posteriormente análisis empleando simuladores para cuando el proceso es batch y para cuando es continuo, encontrando que la alternativa propuesta es viable desde el punto de vista técnico.

Gomez-Castro *et al.* 2010, compararon dos procesos de obtención de biodiesel sin uso de catalizadores: destilación reactiva y destilación reactiva con acoplamiento

térmico. Ambos procesos fueron simulados usando Aspen One® y se encontró que la destilación reactiva con acoplamiento térmico tiene menor consumo energético. También se ha encontrado que la mezcla de ésteres del producto de cola de la destilación reactiva puede ser usado como biodiesel (Cossio-Vargas *et al.* 2011).

La tabla 1 resume las materias primas y rutas de obtención que son utilizadas actualmente a escala industrial en el mundo. Para su elaboración se consultaron los trabajos Salvi y Panwar 2012, que es una revisión de los procesos de producción de biodiesel analizando diversas materias primas, su disponibilidad y costos, y Santori *et al.* 2012, quienes realizaron una revisión de las tecnologías existentes actualmente para producir biodiesel haciendo hincapié en los inconvenientes de unas y las ventajas de otras. Todas las opciones que se consignan en la tabla 1 se categorizan como de primera generación por el origen de sus materias primas.

Tabla 1. Algunas rutas posibles para producir biodiesel partiendo de aceites.

Tipo de Catálisis	Homogénea con metanol	Heterogénea con metanol	Homogénea con etanol	Heterogénea con etanol
Ácida	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza
Básica	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza	Palma Higuerilla Soya Colza

Fuente: La Autora.

1.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN (EE)

Los proyectos de inversión surgen como respuesta a determinadas necesidades humanas y su éxito depende de la importancia de la necesidad a satisfacer. Desde

el punto de vista empresarial, lo que interesa es la posibilidad de que el valor generado supere o al menos corresponda a una determinada capacidad y disposición a pagar. La evaluación económica de proyectos de inversión es, entonces, un proceso sistemático que permite identificar, medir y valorar los costos y beneficios relevantes, asociados a una decisión de inversión, para emitir un juicio objetivo sobre la conveniencia de su ejecución desde distintos puntos de vista: económico privado o social público (Aguilera y Sepúlveda, 2005).

La clásica EE que analiza la oportunidad de entregar ciertos fondos a cambio de recibir otros fondos, tanto para decidir sobre una alternativa de inversión aislada, como para seleccionar entre varias cuál es la mejor desde el punto de vista económico, cuando estas son mutuamente excluyentes; ha sido aplicada a proyectos encaminados a la producción de biocombustibles desde cuando se obtuvieron los primeros ASP¹³ y en ese entonces la conclusión fue que producir biodiesel no era rentable.

Los frentes de avance, tanto de la EE en general como la de proyectos de producción de biocombustibles, se dirigen a incorporar los cambios políticos, económicos y sociales que transforman los escenarios que rodean un proyecto en desarrollo, generando transformaciones cualitativas y cuantitativas que pueden llevar un proyecto exitoso al fracaso y a un proyecto con muy baja o nula rentabilidad a convertirse en un proyecto exitoso.

Los economistas hoy en día ya no creen que los mercados definen y solucionan todos los problemas. Actualmente la tendencia es a incorporar análisis complementarios que involucren modelos sociales y ambientales para dictaminar políticas que generen reales beneficios. Los sistemas sociales, ambientales y económicos comparten ciertas características, pero su evaluación típicamente es guiada por preferencias humanas de corto término (Fullerton y Stavins 1998).

¹³ Antes de que hiciera visible la escasez real o potencial, local o generalizada, de los combustibles fósiles.

Limburg *et al.* 2002, argumentan que se necesita evaluar los servicios que ofrecen los ecosistemas y conectar esta evaluación con la selección de recursos para evitar que se produzcan cambios irremediables.

Respecto a la parte social, hoy se tiene claro que sistemas de distribución equitativa de beneficios sociales pueden ser conseguidos mediante iniciativas voluntarias, reconociendo que las empresas privadas son agentes potenciales de desarrollo social. El beneficio social que proveen las empresas se ve retribuido en facilidades para su funcionamiento, gracias a la armonía que se tendrá para el desarrollo de las actividades económicas (Esteves y Vanclay 2009).

En particular para poder tomar decisiones acertadas se busca cada vez mayor información, se plantean diversos análisis de sensibilidad de los resultados a los cambios de escenarios y se recurre a análisis y decisiones en situaciones de incertidumbre con instrumentos tipo redes neuronales o métodos tipo Montecarlo.

Al concentrarse en la EE dentro del ASP se pasa de considerar proyectos de inversión en general a proyectos de inversión en plantas industriales; por otra parte, al análisis de incertidumbre de tipo técnico consignado en el numeral 1.1.2 de este documento, se debe añadir el análisis de la incertidumbre de tipo económica-financiera y de mercados.

Al intentar un recuento, así sea somero, de la reciente producción bibliográfica en este frente de avance, aún con ecuaciones de búsqueda restrictivas, se encuentra una explosión de documentos. No obstante, por una parte, en términos de planteamientos esenciales el tema no ha superado los de libros clásicos de ingeniería química como el de Rudd y Watson 1968 y de otros que se renuevan en sucesivas ediciones (Peters and Timmerhauss 2002 y el Manual del Ingeniero Químico de Perry y Chilton hasta 1973 – quinta edición, traducida al español en

1976 y de Perry and Green desde 1984 – sexta edición hasta la octava edición de 2008). Por otra parte, esos libros clásicos, o sus autores y editores se han encargado de hacerle seguimiento y de adoptar en sucesivas versiones los principales avances de la EE dentro del ASP.

A título de ejemplo en Perry y Chilton 1973, ya se adoptan los aportes de Rudd y Watson 1968, en cuanto a que el principal indicador y criterio de toma de decisiones de la EE que es la tasa interna de retorno del proyecto en términos monetarios, debe superar la suma de dos componentes: la tasa atractiva mínima monetaria esperada por el agente económico (que en caso de proyectos financiados con recursos externos es equivalente al interés bancario) y un interés de riesgo. Obsérvese que en el interés monetario se tiene ya involucrado lo que corresponde a la suma de un interés real y de la inflación esperada.

Es precisamente el interés de riesgo la medida integral financiera de todos los aspectos de incertidumbre del proyecto y se sugieren y estiman valores para el mismo en diferentes situaciones. En el interés de riesgo se tienen en cuenta las incertidumbres tecnológicas ya referidas; las incertidumbres del mercado: precios, demandas y ofertas; los factores de riesgo país y/o del sector industrial del escenario de inversión que tocan ya con variables sociopolíticas y de legislación; el nivel de avance del ASP que se correlaciona con la calidad y detalle de la información que lo soporta. A los factores de riesgo anteriores que podrían recibir el calificativo genérico de objetivos, se añaden factores de riesgo subjetivo que también influyen en la determinación del interés de riesgo: las capacidades financieras y disponibilidad al riesgo del agente que enfrenta el ASP y la EE, el nivel de solvencia y aprendizaje del agente en el sector del proyecto.

Avanzando en el ejemplo analizado, en Perry y Green 1997, en su sección o capítulo 9, sub secciones 9-19 a 9-38, se aborda de fondo la influencia de la inflación, el análisis de sensibilidad incluidos los basados en métodos de

Montecarlo y una secuencia de ejemplos en los cuales se afrontan los diferentes factores de incertidumbre mencionados en el párrafo anterior. Significativo el uso de resultados en términos de valores esperados, que corresponden a multiplicar el valor medio de una variable en un proyecto (por ejemplo la tasa interna de retorno – TIR -, o el valor presente neto - VPN -) por la probabilidad de obtenerlo. Significativo también el uso de resultados en términos de distribución de probabilidad de resultados de EE, mediante simulación que toma aleatoriamente valores de variables de entrada, con base en sus funciones de probabilidad; como se sabe, al contar con funciones de distribución de probabilidad, se pueden determinar intervalos y bandas de confianza de los resultados de EE, con el nivel de confiabilidad que se escoja.

Ya en Perry y Green 2008, en la sección 9, que sigue abordando la economía de los procesos, como en las ediciones anteriores, se cambia fuertemente la distribución de los temas antes considerados y se añaden temas nuevos; es así como en la sub sección 9-32 se introducen, como parte del análisis de sensibilidad los conceptos de puntos de equilibrio o “puntos de quiebre” (Break - Even Analysis), que corresponden a situaciones de equilibrio del proyecto o de no pérdidas ni ganancias, o de mínimos requisitos que se deben cumplir para decidir avanzar en el proyecto.

Se pueden destacar algunos valores del tipo señalado como: a) el precio de equilibrio del producto: mínimo precio para que el proyecto se pueda adoptar y que debe ser menor que el precio esperado del mercado y la diferencia con respecto a él es el margen de competitividad o de rentabilidad; b) producción de equilibrio que es determinada por variables de oferta y demanda y que corresponde al mínimo de producción por unidad de tiempo para que el proyecto sea sostenible; esta debe ser considerablemente menor que la capacidad de producción de diseño y la diferencia es también medida de competitividad y rentabilidad; c) otros precios de equilibrio como el de una materia prima o insumo clave que puede ser la energía.

En la misma edición de Perry y Green 2008, se introduce un sub capítulo con el título “capital project execution and analysis” en el que se hace una muy interesante distinción entre lo que es el análisis de incertidumbre en particular y de rentabilidad en general para un proyecto FEL (Front-End Loading¹⁴) Vs para un proyecto EPC (Engineering, Procurement, Construction¹⁵). En forma resumida el esfuerzo de análisis de incertidumbre se concentra en la fase FEL del proyecto y uno de los objetivos de ese análisis es minimizar la incertidumbre hasta el punto de que el agente económico asegura la “controlabilidad” del mismo y por tanto se decide a ejecutarlo.

En alguna medida el momento de cambio de un proyecto de tipo FEL a uno de tipo o en fase EPC, se asocia con el de cierre de selección de accionistas o inversionistas; con el fin del ASP que le da paso a la ingeniería de detalle y a construir y arrancar la planta en análisis; con el inicio del manejo de la información y del archivo de proyecto en forma privada con fuertes controles de acceso mediados por contratos de confidencialidad.

En los últimos años se da un giro hacia el tema de las estrategias y métodos de reducción o minimización de la incertidumbre con base en inteligencia tecnológica, manejo de bases y sistemas de datos y de información, a generar curvas de aprendizaje, con repercusiones en integración del mundo del conocimiento sobre un proceso o sobre una cadena de producción con el mundo del sector o sectores productivos correspondientes. En la práctica los agentes económicos productivos del sector industrial se integran con agentes económicos del sector de la ciencia y la tecnología. En la práctica entran en juego otros agentes y variables en la sucesión de hechos que disminuyen la incertidumbre del ASP y de la producción

¹⁴ Una traducción no literal sería un proyecto en etapa de definición o acomodamiento a los intereses del agente económico que lo analiza.

¹⁵ Una traducción no literal sería un proyecto definido y aprobado por el agente económico que lo estudia y en vía de construcción e iniciación de operación.

misma de algo y entre ellos por una parte los estados nación y, por otra parte, complejas corporaciones nacionales y multinacionales.

A título de ejemplo vale la pena analizar lo reportado por González *et al.* 2004, para el caso de la gestión de la incertidumbre de la industria azucarera y de procesos químicos de Cuba, con significativo éxito de un estado nación soportado en esfuerzos de universidades y centros de investigación.

Es también interesante el caso de la producción de biocombustibles en Colombia, escenario y marco de la investigación objeto de este documento, donde una estrecha alianza de agentes económicos alrededor de FEDEPALMA y ASOCAÑA, de agentes científico – tecnológicos alrededor de CENIPALMA, CENICAÑA y algunas universidades y agentes estatales que generaron legislación favorable, minimizaron la incertidumbre¹⁶ y establecieron condiciones propicias al nacimiento y crecimiento de las cadenas de bioetanol y de biodiesel. En capítulos sucesivos se plantean y analizan con más detalle los escenarios correspondientes.

1.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El ACV puede ser considerado como la herramienta que marca el estado del arte de la gestión ambiental, en especial en la industria, por un lado desde controles y acciones al final del tubo hasta los enfoques preventivos y anticipativos de producción limpia y, por otro lado, como punto de llegada de enfoques y metodologías que empezaron con el control de pérdidas y siguieron con las

¹⁶ La incertidumbre tecnológica se disminuyó mediante investigación y transferencia tecnológica en el sector, en la cadena y en el país; muy importante lo ocurrido con las cadenas de la caña y de la palma. La incertidumbre de mercados se minimizó con precios regularizados favorables y con la alianza con la cadena del petróleo, controlada esta por un monopolio de economía mixta que integra desde la símica hasta la distribución de combustibles. La incertidumbre financiera se minimizó mediante fondos financieros blandos y subsidiados, en especial para el cultivo de la palma africana pero que llega a otros eslabones de la cadena. La incertidumbre sociopolítica se minimizó con una red de relaciones privados – estado que permite control en la toma de decisiones pertinentes, macroeconómicas y sectoriales.

auditorías energéticas¹⁷. Involucra conceptos y criterios de eco-diseño, mercados y productos verdes, entre otros. Además forma parte de los enfoques de gestión integral hacia la responsabilidad social empresarial, línea de conexión con sistemas de gestión de riesgos, de salud ocupacional, de seguridad industrial y de responsabilidad social.

Así mismo, el ACV es el ámbito de convergencia de la gestión de calidad¹⁸ y de la orientación del desempeño industrial hacia el modelo de desarrollo sostenible¹⁹. Es una herramienta reconocida internacionalmente (contemplada dentro de las normas ISO 14040 e ISO 14044 del 2006) y de los sistemas de gestión ambiental (SGA²⁰) usada para evaluar los impactos ambientales generados por un producto a lo largo de su ciclo de vida.

1.3.1. Metodología del ACV

La metodología consta de cuatro etapas principales: definición de objetivos y alcances del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación.

1.3.1.1. Definición de los objetivos y alcances del ACV

El grado de detalle y el marco temporal de un estudio de ACV varían significativamente según el objetivo y alcance definidos y por eso esta etapa es tan importante. El objetivo determina por qué se adelanta el ACV (incluyendo el

¹⁷http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/6/55868-6.pdf&ei=oULjT77uCIT28gTHI-iGCA&usg=AFQjCNGZYD_544two9jutpGj-B1EaFRO_g

¹⁸Muy visible por ejemplo en la complementación y evolución de las normas ISO 9000 a las ISO 14000 y de estas a otros instrumentos de gestión (García Fidalgo 2012).

¹⁹En particular para aplicar uno de los principios del desarrollo sostenible que es el de producir y actuar dentro de los límites físicos y biológicos del planeta y con prudente distancia de los límites de resiliencia y de irreversibilidad, para hacer efectivo el compromiso de no frustrar el desarrollo de las futuras generaciones ni amenazar la vida humana y general en el planeta (<http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>, Rockström 2009, Cuevas Reyes 2010)

²⁰http://ec.europa.eu/environment/emas/index_en.htm ; <http://eur.lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:114:0001:0029:ES:PDF>

uso previsto de los resultados) e impone el sistema y las categorías de datos a estudiar e incluso involucra condiciones derivadas del destinatario de los resultados. Por otra parte, en la definición del alcance se deben definir aspectos como el sistema del producto a estudiar y sus funciones, la unidad funcional, los límites del sistema del producto, las reglas de asignación, los tipos de impacto y la metodología de evaluación de impacto, así como la consiguiente interpretación, las hipótesis, las limitaciones y los requisitos de calidad de los datos. En otras palabras, de esta primera etapa dependen las sucesivas, descritas en los numerales 1.3.1.2. a 1.3.1.4.

La unidad funcional representa la función del sistema y es la base de cálculo y la referencia para la evaluación de los flujos e indicadores. Los límites del sistema definen los elementos o etapas del ciclo de vida a tener en cuenta; es común que se desprecien o no se incluyan algunas y para esto se utilizan los denominados criterios de corte.

La asignación es uno de los temas más polémicos a la hora de realizar un ACV, se presenta cuando se tienen procesos multifuncionales o multiproducto y se trata de cómo repartir (asignar) los impactos. En estas situaciones se recomienda por una parte, expandir el sistema bajo estudio para evitar tener que hacer asignación²¹ ó, utilizar indicadores másicos, energéticos, económicos o sociales, según el objetivo trazado, para asignar a cada producto el impacto ambiental correspondiente

De acuerdo con la ISO 14044 2006, la asignación económica debe ser la última opción, sin embargo en la literatura es común encontrar análisis que la emplean debido a su simplicidad y a que sirve para ilustrar sistemas complejos dónde hay criterios que no pueden ser evaluados en unidades físicas. Las desventajas de la

²¹Significa, como se precisa en el numeral 1.3.2., determinar los impactos ambientales de los coproductos, derivados de procesos alternos de producción de los mismos y descontarlos del impacto ambiental calculado en el ACV en análisis y la diferencia es el impacto que le corresponde al producto principal.

asignación económica vienen dadas cuando hay cambios drásticos y frecuentes en los precios. Aunque no hay una mejor forma de hacer asignación debido a la extensa diversidad de casos, se recomienda que la asignación económica sea usada cuando los precios entre los coproductos y/o coservicios sean bastante diferentes (Ardente y Cellura 2012).

Los resultados cambiaban drásticamente y por ende las conclusiones que se obtienen en cada caso son contrarias (Nguyen *et al.* 2012).

En Wardenaar *et al.* 2012, se presenta un análisis de cómo las directrices de biocombustibles se ven afectadas por la asignación. En este se aplica ACV a la producción de bioenergía de colza y se estudia la variación de los resultados dependiendo del tipo de asignación que se usa: energética, económica o sustitución. Los resultados y conclusiones de los ACV varían drásticamente con el tipo de asignación y por ende, el trabajo concluye que las directrices de comparación de biocombustibles deben unificar los criterios de métodos de asignación para evitar subjetividades a la hora de tomar decisiones.

1.3.1.2. Análisis de inventario de ciclo de vida

“El análisis del inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema producto” (ISO 14040, 2006). De una forma genérica se denominan estas entradas y salidas a efectos ambientales conocidos “carga ambiental”. Esta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc.

En esta etapa se llevan a cabo los siguientes pasos prácticos:

- Trazar un diagrama de flujo inicial del proceso que permita apreciar de forma gráfica los flujos del sistema con todas sus entradas y salidas más relevantes, reuniéndose, de este modo, los datos necesarios.
- Agregar al diagrama de flujo los procesos adyacentes correspondientes, entre los que se encuentran: los procesos auxiliares, el transporte y el suministro de energía.
- Realizar los refinamientos necesarios en los límites del sistema establecido
- Compilar de los datos y procedimientos de cálculo
- Validar los datos con respecto a los objetivos y alcance definidos para el estudio.

Es de vital importancia que en el análisis del inventario todo el conjunto de datos y parámetros utilizados tenga la máxima objetividad posible, en el sentido de que correspondan a la situación y escenario específicos en análisis, porque los resultados finales del análisis son muy sensibles a su exactitud y precisión. Este es uno de los aspectos que hacen menos confiables ACVs realizados con bases de datos e inventarios de impactos referenciales o tomados de otros escenarios, así estos sean parecidos. Desafortunadamente el recurso de bases de datos no correspondientes es en ocasiones la única salida, ante los costos, tiempos o dificultades insalvables para obtener información específica. Se suele recurrir a software existentes de ACV que poseen sus propias bases de datos y el precio es función sobretodo de la extensión y calidad de éstas.

1.3.1.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida

La tercera etapa del ACV, tiene por objetivo valorar los resultados del análisis del inventario del producto o servicio en cuestión, cuantificando los posibles impactos medioambientales. Consta de una fase técnica, considerada obligatoria por la metodología y, otra opcional (de carácter político), por parte del interesado del proyecto. En esta etapa, se incluyen los pasos descritos en la figura 2.

El primer paso es la selección y definición de las categorías de impacto potencial, de los indicadores de cada categoría y de los modelos de estimación, se orientan o tienen en cuenta los efectos (impactos de punto final “end point”) sobre el medio ambiente, generados por el sistema de producción analizado. El segundo paso se conoce como Clasificación en la cual los resultados del inventario se asignan respectivamente a cada una de las categorías de impactos previamente seleccionadas. El último paso (caracterización) consiste en la modelización mediante los factores de caracterización de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. Cada categoría de impacto se precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría. La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría.

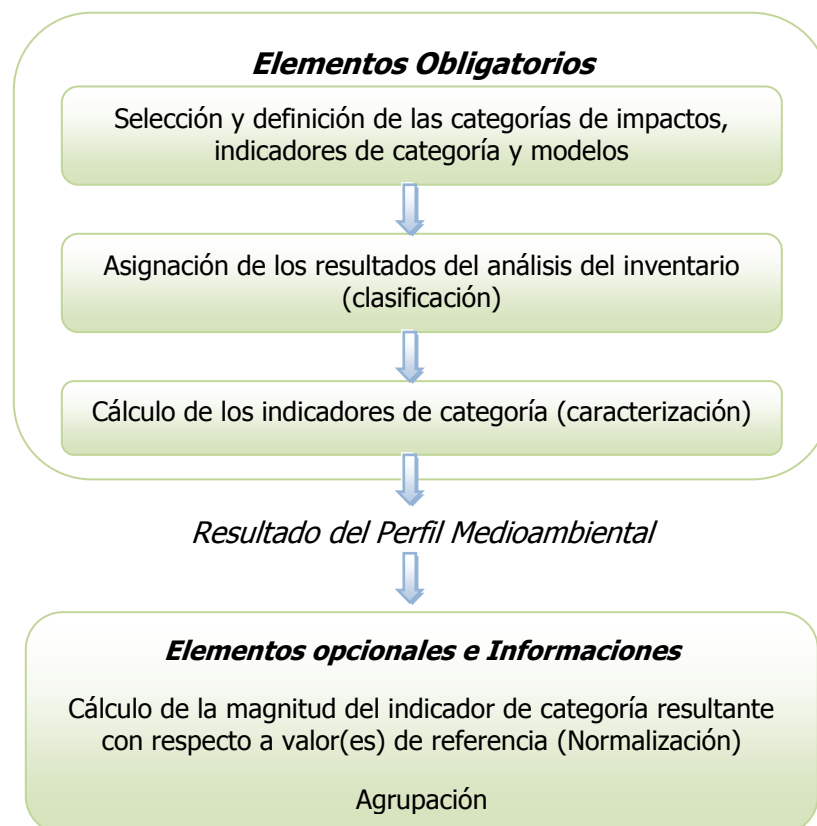


Figura 2. Componentes de la etapa de evaluación del impacto del ACV.

Fuente: ISO 14040, 2006.

En la evaluación del impacto es donde los caminos posibles se hacen muy numerosos porque se tienen elementos obligatorios y elementos opcionales y al incluir o excluir algunos elementos opcionales se afectan los resultados finales. Otra razón, es que en esta tercera etapa se utilizan métodos de evaluación de impactos que pueden ser de tipo end point²² o mid point²³. Si se quiere realizar la evaluación con end points el principal inconveniente es que aún no hay un consenso dentro de la comunidad científica de cuáles son las categorías de impacto final que deben ser definidas²⁴ y si se trabaja con únicamente con mid points el problema que se presenta es que para cada categoría de impacto²⁵ existe más de un modelo para llevar las corrientes a una sola unidad; para una categoría de impacto por lo general existen en la literatura varios modelos, y está comprobado que utilizar uno u otro afecta el resultado final del ACV.

1.3.1.4. Interpretación del ACV

La interpretación es la etapa del ACV en la que se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, con el fin de realizar una evaluación de las incertidumbres, valorar la calidad de los datos y generar un informe con las conclusiones y recomendaciones, que pueda dar respuestas a las cuestiones que anticipadamente fueron definidas en los objetivos y alcance del estudio.

²²O de efecto último del impacto ambiental: que afectan directamente a la sociedad.

²³O de efectos intermedios: cercanos a la intervención ambiental.

²⁴En algunos artículos se proponen cuatro categorías de impacto final: salud humana, entorno natural, recursos renovables y entorno modificado por el hombre. En otros artículos se proponen las cuatro anteriores y otros adicionales, por ejemplo: biodiversidad (genética, especies y ecosistemas) y funciones de soporte de vida (clima, ciclos hidrológicos, fertilidad de los suelos y ciclos biogeoquímicos) (Bare *et al.* 2000).

²⁵Algunas de las categorías de impacto tipo mid point son: agotamiento de recursos abióticos, uso del suelo, cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación, eutrofización, toxicidad, otros.

1.3.2. Frentes de avance del ACV en general y aplicado a biodiesel

La ventaja de la metodología clásica del ACV que se consagró en el conjunto ISO 14000 y 14044 es la generalidad de su aplicabilidad: aplicable a todo producto con la tecnología y escala de producción que se escojan, en cualquier escenario de producción y de mercado, tanto del producto como de los insumos y factores de producción y sobre todo con el número de etapas del ciclo de vida que se defina (incluida la posibilidad de una sola etapa del ciclo: la de producción). No obstante en un contexto de metodología para toma de decisiones y para decidir entre alternativas, la ventaja se convierte en limitación de su utilidad, por cuanto se llega a tal diversidad de contextos del ACV para un mismo producto, que la posibilidad de utilizarlos para comparación de resultados es, en términos prácticos, una casualidad; así mismo la idea de poder considerar solo una etapa o pocas, desvirtúa la idea de “ciclo de vida”.

Añádase a lo anterior la gran cantidad de factores que la metodología deja al arbitrio o decisión del destinatario del ACV o en función de los objetivos y alcance, los tipos o categorías de impactos potenciales o finales que se incluyan, los elementos opcionales en la etapa metodológica de evaluación y la posibilidad de diferentes software soportados con diferentes bases de datos de soporte, entre muchos otros aspectos que pueden cambiar, y es muy fácil que cambien de un ACV a otro.

El ACV es utilizable y se utiliza en cualquier combinación de las variables mencionadas y se puede orientar a soportar, e incluso a justificar, la decisión que se desee, pero los ACVs realizados con ese enfoque, difícilmente permiten comparar situaciones y tomar decisiones entre una u otra combinación de variables para la producción y distribución de un determinado producto.

Lo mencionado en términos generales es válido cuando se considera el caso del ACV para biocombustibles en general y para biodiesel en particular, en especial dentro del contexto de integrar ACV con ASP y EE, cuyo objetivo es seleccionar y evaluar alternativas de producción de este tipo de combustibles para tomar decisiones y eventualmente identificar el conjunto óptimo de condiciones en un determinado universo de opciones.

Similar situación se presenta cuando se evalúa el uso de la biomasa para suplir demandas energéticas que se fundamentan principalmente en que se reduce el consumo de materiales no renovables, ayudando de esta manera a mitigar el cambio climático y a eliminar la dependencia de países sin reservas de petróleo, gas o carbón. La hipótesis es que los combustibles líquidos derivados de biomasa, pueden ofrecer estos beneficios a diferentes sectores (sobretudo el de transporte) y países, y entre ellos con mayor ventaja los que se alinean con que actualmente se da una clara tendencia a la “dieselización”, o uso de motores de encendido por compresión (ciclo e índice de decano), versus el uso de combustibles tipo gasolina (ciclo e índice de octano) o de encendido por chispa.

El tema de cómo evaluar los beneficios ambientales que ofrece el biodiesel ha generado gran controversia en años recientes. Los resultados de ACV aplicados a biodiesel varían significativamente debido a discrepancias en la delimitación de los sistemas, uso de metodologías de asignación y ausencia de datos primarios para las etapas productivas de biocombustibles provenientes de regiones que no han sido estudiadas e incluidas en las bases de datos contenidas en el software.

La delimitación del sistema bajo estudio, repercute directamente en la cantidad de etapas de ciclo de vida a tener en cuenta durante el análisis, puesto que el enfoque convencional de los ACVs es de tipo “de la cuna a la tumba”, la escogencia de la cuna y la tumba es dejada a elección de quien realiza el análisis dependiendo de los objetivos que se haya planteado. Los ACV realizados bajo

este enfoque no cierran el ciclo y difieren en cuál es la tumba y cuál es la cuna, y por este mismo motivo algunos concluyen que los biodiesel son una alternativa energética amigable con el medio y otros afirman todo lo contrario²⁶. Dependiendo del criterio para hacer la delimitación del sistema usado, en la literatura se encuentran dos tipos de ACV aplicados a biodiesel:

- “Cradle to gate”: en trabajos en español estos análisis son conocidos como “de la cuna a la puerta”. Las etapas que se incluyen en estas evaluaciones son la agrícola, producción del aceite y transformación del aceite en biodiesel. Queiroz *et al.* 2012, realizaron un ACV a la producción de biodiesel de palma en el Amazonas donde incluyeron las etapas: agrícola, extracción del aceite y producción del biodiesel, este trabajo tiene cuna en la etapa agrícola y la puerta en la planta de producción de biodiesel.
- “Cradle to grave”: este es el mismo “de la cuna a la tumba” y cuando el objeto de estudio es un biocombustible que se usa para el transporte, algunas referencias lo llaman “well to wheel” (“del pozo a la rueda”). Estos ACV contemplan la etapa agrícola, la obtención del aceite, la producción del biodiesel y su uso en el sector transportador. Fazio y Monti 2011, contiene varios LCA de tipo “cuna a tumba” para diferentes alternativas y escenarios para producir biocombustibles que son usados para generar electricidad, calor y transporte. Todos estos estudios parten del cultivo y terminan en la etapa de uso del biocombustible. Nanaki y Koroneos 2012, comparan el biodiesel, diesel y gasolina para transporte. Las etapas que incluyen en este análisis comparativo son: la extracción del crudo, su refinación y uso, para los casos del diesel y la gasolina. Para el análisis del biodiesel se incluyen las etapas: cultivo, extracción del aceite, producción del biodiesel y su uso. En ambos casos se encuentran trabajos que evalúan las emisiones

²⁶Estudios como Kumarappan y Joshi 2011, Man Kee *et al.* 2009 y Kian Fei *et al.* 2009 defienden la sostenibilidad y el carácter bio de biodiesels de diversas materias primas, mientras trabajos como Johnson 2008, Reijnders y Huijbregts 2008 y Borjesson y Tufvesson 2011, aseguran que muchos biodiesels generan en su ciclo de vida más impacto que el diesel proveniente del petróleo.

causadas por el cambio del uso del suelo dentro de la etapa agrícola. Esta integración de ciclos biogeoquímicos constituye un acercamiento al enfoque “de pozo a pozo” ó “de la cuna a la cuna” cuando hablamos de una forma más general.

A su vez, las metodologías de asignación más utilizadas para analizar sistemas multiproducto en los ciclo de vida de biodiesel, se dividen en dos tipos (Hoefnagels *et al.* 2010):

- Asignación basada en masa, contenido energético o valor económico. La ventaja de cualquiera de estas tres metodologías es que son de fácil aplicación, sin embargo, la asignación basada en el valor económico de los productos no es muy recomendada porque cambia dependiendo de los precios del mercado (Morais *et al.* 2010).
- Expansión de los límites del sistema. Esta consiste en descontar al sistema bajo estudio las emisiones generadas por la producción de los coproductos mediante otras rutas. La principal desventaja de esta metodología es que aumenta los alcances del análisis y se hace necesario evaluar las emisiones de los sistemas de producción de los coproductos (Koers *et al.* 2008).

Existen otras formas de hacer asignación teniendo en cuenta criterios muy particulares que dependen del caso a analizar. Por ejemplo, los argentinos usan el contenido proteico como criterio de asignación cuando analizan el caso de la soya. Koderá 2007, contiene una recopilación de los criterios de asignación existentes.

El enfoque “de pozo a pozo” ó “de la cuna la cuna” aumenta la objetividad de los estudios de sistemas de producción de biodiesel gracias a que cierra la cadena productiva con la integración de los ciclos biogeoquímicos e incluye todas las etapas de producción involucradas. A su vez, al cerrar el ciclo se expande el sistema bajo estudio evitando en muchos casos la asignación al identificar las

corrientes que se recirculan. La expansión del sistema es la mejor alternativa para disminuir la incertidumbre causada por la asignación, y, en lo que se refiere a la producción de biocombustibles, se justifica puesto que integra criterios de mercado y promueve los coproductos (Benoist *et al.* 2012).

El concepto “cuna a cuna” fue propuesto hace cerca de una década para enfocar el proceso de diseño tanto de productos como de procesos. Aplicar los lineamientos del diseño “cuna a cuna” es una buena forma de conducir la industria hacia la ecoeficiencia (Braungart *et al.* 2007). La idea central del diseño “cuna a cuna” es unificar criterios en las etapas de desarrollo del producto, manufactura, diseño de materiales, etc., para facilitar el reciclaje y reutilización de los residuos luego del uso del producto (Alston 2008).

Bajo este mismo concepto “cuna a cuna”, donde hay reciclaje y reuso de materiales, se han realizado algunos ACV. Con el reuso y el reciclaje en los sistemas, aplicar la metodología tal y como se establece en las normas ISO 14040 y 14044, suele ser más complicado que cuando no hay reciclajes. Trabajos recientes como el de Tingley y Davison 2012, proponen nuevas metodologías ACV para evaluar estos casos de reciclaje y reuso. Cabe anotar, que todos los ACV tipo “cuna a cuna” que se han realizado son en el área de la construcción y materiales.

Acevedo *et al.* 2009, desarrollaron una metodología “cuna a cuna” siguiendo los lineamientos del ACV para ser aplicada a sistemas de biocombustibles. En esta metodología no se cierran los ciclos con etapas de reuso o reciclaje, sino que se recorre el proceso productivo completo hasta llegar a los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza. Estos ciclos incorporan en las materias primas materiales provenientes de los residuos de las diferentes etapas que se recirculan.

En el trabajo Martínez *et al.* 2010, ambos conceptos “cuna a cuna” se combinan, y se analiza un sistema donde se incluyen ciclos biogeoquímicos y la utilización de

los residuos lignocelulósicos de la industria palmera para producir el etanol para la etapa de transesterificación del aceite de palma.

El análisis comparativo de los dos enfoques de “cuna a cuna” se puede orientar a comparar las estrategias fundamentales que los orientan y los objetivos últimos implícitos en cada enfoque.

En el caso de “cuna a cuna” buscando cerrar los ciclos con reuso y reciclaje, es clara la orientación de estrategias de producción más limpia (Agenda 21), ecodiseño, ecoeficiencia (Burnet y Hansen 2008) y otras de corte similar, que combinadas con valorización de residuos y aplicación de todas las estrategias no solo en términos internos de un proceso o de una cadena productiva, sino también en términos externos hacia y desde otros procesos y cadenas, conducen al objetivo último buscado que es la minimización de impactos del sistema antrópico de producción - consumo a la naturaleza, en sus dos fronteras de intercambio: mínimas corrientes de insumos desde la naturaleza y mínimas corrientes de descargas hacia ella. Muy poderoso y pertinente el enfoque para el análisis de procesos y cadenas de biocombustibles, sobre todo si se tiene en cuenta que unas de las corrientes minimizadas son las de consumo y disipación de energía. Este primer enfoque lleva a cerrar los ciclos en términos rigurosos, solo cuando se cumple la pretensión de “cero emisiones” que puede ser considerada como una utopía, en cuanto que es inevitable alguna entrada y alguna salida de y hacia la naturaleza (Pauli).

En el caso de “cuna a cuna” hasta incluir los procesos y ciclos biogeoquímicos, se adopta una de las estrategias del modelo de desarrollo sostenible que es la de producir y consumir dentro de los límites físicos y termodinámicos de la naturaleza, con el objetivo último de no superar las fronteras de la irreversibilidad y de la resiliencia y por lo tanto de garantizar la supervivencia. Este enfoque cierra

implícitamente los ciclos en términos rigurosos y permite colocar la cuna y la tumba del ciclo de vida en cualquier punto, por cuanto se regresa a ese punto.

Es claro que el segundo enfoque plantea desafíos metodológicos, de necesidad de información, de herramientas de simulación y modelamiento y de integración multi, inter y transdisciplinaria de conocimientos, cualitativamente mayores que el primer enfoque; superar tales desafíos puede ser también considerado como una utopía en el momento, aunque las dificultades pueden ser menores para cadenas productivas que no tengan tantas derivaciones laterales desde y hacia otras cadenas y que tengan pocas etapas generales entre los insumos primarios de la naturaleza y las descargas finales hacia ella, como, por ejemplo la de biocombustibles.

En la práctica es de esperar que se combinen los dos enfoques, con énfasis casi exclusivo del primero como ocurre en la actualidad, pero creciente hacia el segundo enfoque, a medida que se avance en la superación de los desafíos descritos.

1.4. INTEGRACIÓN ASP, EE y ACV

La integración ASP y EE, tal y como se mencionó al inicio de este capítulo es una integración clásica, que se ha venido aplicando desde hace décadas. Diversas metodologías para evaluar ventajas específicas y globales de tecnologías han sido consignadas en artículos y libros. Parámetros como: madurez tecnológica, eficiencias, flexibilidad, valor agregado del producto, consumo energético, inversión total, tasa interna de retorno, tiempo de recuperación de la inversión, entre otros; son comúnmente medidos y analizados para implementar o descartar procesos productivos.

Dentro de los elementos económicos típicamente evaluados en este tipo de análisis encontramos algunos microeconómicos en el sentido de economía de firma (por ejemplo, inversión, capital y costos de operación) y algunos macroeconómicos en cuanto relacionados con economía del estado (por ejemplo, valorización e impuestos); como novedad es cada vez más frecuente llegar a tocar componentes sociológicos y hasta éticos (contribución al empleo, responsabilidad social empresarial). Matos y Silvestre 2012, propone nuevas estrategias para direccionar el proceso de toma de decisiones de forma que se conecten de una manera eficiente las partes interesadas y se puedan superar los retos que se generan a causa de conflictos de interés cuando se pretende mejorar la sostenibilidad en las cadenas productivas.

El desarrollo de un proceso llamado social licence in design (SLD) que sirve para hacer frente a retos sociales y oportunidades que las tecnologías deben alcanzar durante su implementación es reportado en Franks y Cohen 2012. SLD utiliza técnicas de investigación social cuantitativas que comprenden no solo la perspectiva y valores de quienes toman las decisiones (eficiencia técnica y económica), sino que también incluye los puntos de vista de las demás partes involucradas (componentes sociales).

Respecto a la integración EE y ACV, existen numerosos modelos y metodologías de evaluación de procesos en la literatura para evaluar el desempeño ambiental de procesos industriales, sin embargo, existen pocos trabajos que evalúan criterios ambientales y económicos de manera simultánea.

Santos da Silva y Gocalves 2009, desarrollaron una metodología que integra el ACV con análisis de costos de producción (una de las etapas que conforma la metodología de EE) que permite identificar las etapas productivas del proceso que tienen alto impacto ambiental y que incrementan los costos ambientales de las compañías. Por su parte, De Benedetto y Klemes (2009), viendo la necesidad que

se tenía de un enfoque novedoso que permitiera complementar los aspectos ambientales y financieros realizaron un modelo de evaluación que arroja un mapa gráfico que permite combinar los indicadores ambientales más relevantes (huella de carbono) con los costos. Usando este mapa es posible comparar diferentes opciones, siendo éste una herramienta que permite soportar procesos de toma de decisiones.

En un contexto más general, la integración del ACV y de la EE se ha venido desarrollando junto con la economía ecológica (Costanza 1991), las cuentas ambientales nacionales y empresariales, además de las cuentas económicas tradicionales, con la implicación de superar:

- Economía convencional, que se ocupa solo de los sectores económicos y de la matriz de intercambios entre ellos.
- Ecología convencional, que se ocupa solo de los sectores ecológicos y algo de los intercambios entre ellos.
- Economía de recursos naturales, que se ocupa de los flujos físicos y de valor desde los sectores ambientales hacia los sectores económicos
- Economía ambiental, que se ocupa de los flujos físicos desde los sectores económicos hacia los sectores ecológicos, asociados a flujos de valor con dirección inversa.

La gran falencia cuya superación es una tarea mundial asociada al modelo de desarrollo sostenible es: dejar de ignorar en la EE los valores asociados a flujos de y hacia la naturaleza que por no tener precio y mercado no están entrando en las cuentas actuales y del pasado (Goodland 1987, Salazar 2011).

Así como de la EE con enfoque empresarial o privado se evoluciona o se escoge como alternativa un enfoque socioeconómico, de economía pública o social, también del ACV con énfasis o base ambiental que determina y evalúa impactos

ambientales (para diferenciarlo de otros se identifica como ELCA: Environmental Life Cycle Analysis), se está evolucionando al análisis del ciclo de vida con énfasis o base social que determina y evalúa impactos sociales (generación de empleo, disminución de la pobreza, impactos sobre la equidad, etc), a los largo del ciclo de vida de los productos (para diferenciarlo de otros se identifica como SLCA: Social Life Cycle Analysis).

Esta evolución y complementación (del ELCA con el SLCA), análoga a la integración y complementación de la gestión ambiental con la gestión de la responsabilidad social es muy novedosa y está siendo objeto de avances conceptuales y de ensayos metodológicos (UNEP_SETAC 2009).

En términos prácticos, en las metodologías de estudios de impacto ambiental se están incluyendo ya como obligatorias para licencias, las correspondientes valoraciones de patrimonios, bienes y servicios de la naturaleza, afectados o involucrados en proyectos de todo tipo, incluidos los industriales (MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE – COLOMBIA, 2010) .

En este frente son pertinentes las citas bibliográficas del numeral 1.3.2. a las que se debe añadir como muy significativo el trabajo de Khandoker *et al.* (2011) que desarrolla y aplica a un ejemplo industrial una metodología de evaluación en la que se integran ASP, EE y ACV con el paradigma “cradle to gate”.

El diseño de procesos más sostenibles es uno de los principales retos para el desarrollo de la industria química. Esta no es una tarea trivial, ya que requiere la traducción de los principios teóricos del desarrollo sostenible en la práctica del diseño. En la actualidad, no existe una metodología general para guiar el proceso de diseño sostenible y casi ninguna experiencia práctica. En un intento por contribuir a esta área emergente, se han propuesto lineamientos metodológicos que integran consideraciones de sostenibilidad en el diseño del proceso. Existen

propuestas que se apoyan en marco conceptual de ciclo de vida, y luego guían al diseñador de procesos a través de las diferentes etapas de diseño para permitir la integración de criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. (Azapagic *et al.* 2006)

Algunos paquetes de diseño y simulación de procesos tales como CHEMCAD (Chemstations, 2003) permiten realizar cálculos de los impactos ambientales de los procesos, incluyendo el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación, entre otros. Sin embargo, la integración de criterios de sostenibilidad en el diseño de procesos y toma de decisiones no es un tema superado en absoluto, ya que hay una serie de desafíos que necesitan ser afrontados para ello, incluyendo:

- Sistemas demasiado grandes debido a que se deben considerar no solo los procesos o etapas industriales, sino todo el ciclo de vida del producto, incluyendo etapas de producción de materia primas además del uso del producto y la disposición de los residuos.
- La necesidad de evaluar el sistema en tres componentes diferentes (económico, ambiental y técnico), e incluir esto en los criterios de toma de decisiones y diseño de procesos.
- Identificación de los indicadores pertinentes y la necesidad de comparar objetivamente los productos de modo que se puedan abrir mercados de exportación.

En un sentido más amplio, la integración del ASP, la EE y el ACV en la ingeniería, implica la inclusión de dos magnitudes fundamentales más a la disciplina, además de la masa, longitud, temperatura y tiempo ($ML\Theta T$) que son el valor (medido monetariamente: \$) económico y el impacto ambiental (IA); es decir pasar a un sistema de seis magnitudes fundamentales ($MLT\Theta\$/A$) (Castillo 2000). En términos prácticos se llega a uno de los propósitos de la presente investigación:

integrar y hacer seguimiento simultáneamente a flujos y balances de masa y energía, económico – financieros y de impacto ambiental.

1.5. INTEGRACIÓN APLICADA A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La aplicación de ASP y EE conjuntamente ha sido llevada a diferentes sectores y el de los biocombustibles no es la excepción; numerosos artículos científicos, textos con análisis encargados por gobiernos, estudios de factibilidad y pre factibilidad han sido realizados a numerosas rutas de obtención de biodiesel. Las materias primas más estudiadas son la palma africana, colza, soya, canola, girasol, aceites reciclados y, jatropha e higuera en menor proporción. Algunos ejemplos de este tipo de trabajos son:

- Apostolakou *et al.* 2009, contiene un análisis tecno-económico de un proceso para producir biodiesel a partir de aceites vegetales cuyo objetivo es investigar la dependencia de los indicadores de rentabilidad con la capacidad instalada.
- Santana *et al.* 2009, presenta un análisis técnico-económico de dos rutas de obtención de biodiesel a partir de higuera. En este trabajo el análisis técnico lo realizan utilizando información proveniente de simulaciones y, el análisis económico es para el caso brasilero.
- Haas *et al.* 2006, desarrollaron un modelo computacional para estimar los costos de capital y producción de plantas productoras de biodiesel a partir de soya de tamaño mediano. Las operaciones envueltas en el modelo son: transesterificación continua y recuperación de ésteres y glicerol.
- Zhang *et al.* 2003, evaluaron desde el punto de vista técnico económico cuatro rutas para producir biodiesel partiendo de aceites usados. Se encontró que el precio de la materia prima y el del biodiesel son las dos variables que afectan en mayor proporción la rentabilidad de los procesos.

- Esguínados *et al.* 2002, es un estudio realizado en los Estados Unidos donde se evalúan varias materias primas para producir biodiesel y etanol.

Es muy grande La cantidad de trabajos y estudios técnico-económicos que se encuentran en la literatura. El tema de producir biodiesel a partir de oleaginosas no es nuevo, e incluso se tienen referencias de los años 70 del siglo pasado.

Además de los análisis técnico-económicos tradicionales, otro tipo de estudios que integra el ASP y EE, son los análisis exergoeconómicos. Este tipo de análisis es un poco más reciente, McGovern y O`Toole 1992, desarrollaron el concepto “flow constraint system” (FCS) para realizar análisis exergético a procesos y obtener diagramas que ilustran la relación entre costos exergéticos y económicos. En Jaimes *et al.* 2010 y 2012, se aplica este concepto a la producción de biodiesel de palma para comparar una tecnología que usa catálisis heterogénea ácida con la convencional que usa catálisis básica homogénea.

En trabajos posteriores como el de Alvarado y Gherardely 1994, se proponen metodologías de optimización de procesos que como primer paso tiene el modelamiento termodinámico y económico de los procesos. La función objetivo en estos casos representa las pérdidas exergéticas y de capital simultáneamente.

Actualmente, la integración EE y análisis exergético se propone como herramienta fundamental para verificar la sostenibilidad de biocombustibles. Font de Mora *et al.* 2012, aplican análisis exergético y EE a diferentes rutas de obtención de biodiesel, partiendo del cultivo hasta la planta de producción de biodiesel. Este estudio concluye que las rutas son eficientes desde el punto de vista exergético, pero debe disminuirse la dependencia de combustibles fósiles en las diversas etapas del ciclo de vida para que también sean económicamente competitivas.

Otra integración que se está usando mucho para analizar la sostenibilidad de biocombustibles es ACV con evaluación exergética. Talens Peiró *et al.* 2010, realizaron un ACV y análisis exergético a la producción de biodiesel a partir de aceites usados, encontrando que la etapa de transesterificación es la que causa el 68% de los impactos ambientales y que las mayores entradas de exergía son las de energía eléctrica y gas natural.

Otras metodologías que parten del mismo principio de aprovechamiento de la energía y los recursos han sido propuestas. Un ejemplo de ellas es el algoritmo de reducción de residuos (waste reduction algorithm – WAR) propuesto por Young *et al.* 2000. Estos autores desarrollaron un algoritmo de reducción de residuos (para describir el flujo y la generación de impactos ambiental a lo largo de un proceso químico. El concepto se fundamenta en que la energía posee impacto económico y ambiental. Por lo que al reducir las pérdidas energéticas se aumenta la rentabilidad del proyecto a medida que se disminuye el impacto ambiental.

Un trabajo reciente que utiliza la metodología WAR para analizar producción de biodiesel es Marulanda 2012. En este artículo se aplica WAR con el objetivo de minimizar los costos e impactos ambientales y se comparan dos alternativas de producción de biodiesel que usan metanol supercrítico usando datos de operación obtenidos de simulaciones elaboradas en Aspen Plus.

De la aplicación simultánea de las tres metodologías a la producción de biocombustibles se encuentran varios trabajos. Los resultados y conclusiones de estos artículos, tesis e informes gubernamentales, muestran resultados contradictorios. La razón principal para esto es que los escenarios particulares de cada región influyen de manera directa y fuerte en los resultados finales. Por otra parte, como ya se había mencionado en el apartado (1.3), los resultados de las evaluaciones ambientales cambian drásticamente dependiendo de las etapas de ciclo de vida que son tenidas en cuenta.

Trabajos como Morais *et al.* 2010, estudian la transesterificación de aceites usados con metanol en presencia de catalizador básico, considerando dos variantes: con pretratamiento ácido y sin pretratamiento. Luego de comparar los resultados técnicos, ambientales y económicos, se encontró que el proceso con pretratamiento es una mejor alternativa. Este estudio es un claro ejemplo de integración de ASP, EE y ACV “puerta a puerta”.

Acevedo *et al.* 2009, compara biodiesel de palma e higuierilla integrando ASP, EE Y ACV “cuna a cuna”. En este trabajo se concluye que la higuierilla aunque es una alternativa técnicamente y ambientalmente viable, tiene el inconveniente de ser no rentable.

1.6. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO USANDO SCOPUS

En el anexo A se presenta un ejercicio muy básico de análisis bibliométrico en el ámbito del sistema de información SCOPUS (que es muy selectivo), utilizando como “ecuación de búsqueda” palabras clave.

Los resultados permiten tener una idea de la evolución de la integración de ASP (se recurrió a la expresión más técnica de diseño de procesos), con el ACV y de la novedad del enfoque o paradigma “de la cuna a la cuna” dentro de LCA.

Una primera conclusión es que definitivamente se generaliza la integración del diseño de procesos con el análisis del ciclo de vida, primero en revistas que se pueden clasificar como especializadas en LCA, luego en las que tienen como tema general las ciencias y tecnologías ambientales y termina por llegar a las especializadas en ingeniería química, incluyendo las emblemáticas o representativas de la disciplina. Por otra parte también ha llegado la integración de los dos temas al frente de la ingeniería en general y a otras especialidades o

temáticas de la misma como materiales e ingenierías asociada al agro. Así mismo es notable la penetración de la asociación mencionada a eventos académicos de gran diversidad de enfoques y temáticas.

Una segunda conclusión, también muy clara, es que el paradigma o enfoque “de la cuna a la cuna” dentro del ACV empieza a penetrar círculos de la comunidad académica y que se asoma la típica etapa de iniciación del tema que suele preceder a las sucesivas etapas de imposición y maduración; otra manera de expresar la conclusión es que definitivamente el tema es aún muy novedoso. Ya es significativo el número de revistas (12) que han decidido publicar artículos con el enfoque referido, aunque solo una (International Journal of Life Cycle Assessment,"4 artículos") con más de un artículo.

Ahora bien, vale la pena mencionar en este apartado cuatro trabajos realizados por la autora que son visibles en SCOPUS:

- Life cycle assessment for joint Production of biodiesel and bioethanol from African palm.
- Exergy analysis of palm oil biodiesel production.
- “Well to well” life cycle assessment for biodiesel production.
- Comparison of technology alternative for palm oil biodiesel production using exergy analysis.

2. PLANTEAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

Se plantea, en este capítulo y se aplica en el sucesivo, una herramienta mejorada para seleccionar alternativas de procesos industriales, basada en ASP, EE y ACV integradas para estimar simultáneamente índices de eficiencia técnica, costos y ambientales con base en sinergias positivas de los balances y análisis de flujos de masa y energía, económico - financieros y de impacto ambiental. Se superan desventajas de las metodologías y herramientas, existentes y entre ellas: la no aplicabilidad general, baja posibilidad de comparar resultados y baja complejidad de las decisiones posibles.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

La herramienta de análisis y selección propuesta se esquematiza en las figuras 3, 4 y 5. Inicia (ver figura 3 parte superior) con el planteamiento del problema primario, que se refiere en la mayoría de los casos, a la necesidad de obtener o fabricar un determinado bien o servicio.

En una primera iteración de la secuencia se evalúan, analizan y seleccionan las alternativas viables en la etapa industrial. A esta etapa de la metodología se le asigna el nombre de análisis “puerta a puerta” (parte izquierda de la figura 3, encerrado en rojo). Los pasos para ello son:

- Con el problema primario en mente, identificar y seleccionar las opciones de diseño mediante la revisión de bases de datos, patentes, documentos técnicos y científicos.
- Teniendo las alternativas se procede a realizar los balances másicos y energéticos para cada una de ellas. Dependiendo del grado de madurez de la tecnología se va a contar con la información suficiente o no. Es frecuente y

probable que en esta etapa se tenga que recurrir al uso de simuladores para completar no solo los balances másicos y energéticos, sino también para estimar las emisiones y vertimiento que se producen.

- Usando la información obtenida en el paso anterior, se evalúan indicadores económicos, ambientales y de eficiencia. Para medir el desempeño ambiental se construye el perfil medio ambiental de cada alternativa usando la metodología ACV “puerta a puerta”.
- Para medir la eficiencia técnica se utiliza la evaluación exergética, que es una metodología que permite medir directamente el aprovechamiento y correcto uso de fuentes energéticas. Indirectamente, por una parte evalúa el aprovechamiento y correcto uso de las materias primas y, por otra parte, minimiza las emisiones, descargas y residuos, promoviendo así la minimización de impactos ambientales potenciales y finales asociados.
- Una vez se cuenta con los indicadores, se procede a verificar si las alternativas cumplen con lo mínimo requerido: con la legislación ambiental y que sea rentable. En el caso en que el proceso no cumpla con alguna de estas dos restricciones, se evalúa si es posible hacer mejoras y si es el caso se plantea una alternativa nueva optimada que se reciclará en el proceso de selección. Por su parte, las alternativas que no puedan ser mejoradas serán descartadas.
- Las alternativas rentables y que cumplen con la legislación ambiental también son analizadas con el fin de identificar si se puede mejorar su desempeño económico y ambiental. Para dar respuesta a esta incógnita el análisis exergético es diligente. Si es posible, se procede a plantear una nueva alternativa que es reciclada, de lo contrario, se preselecciona.
- En cualquier iteración de la secuencia global, incluida la primera, se puede y generalmente se debe repetir la secuencia hasta ahora descrita, un número significativo de veces. El problema inicial abordado va cambiando a medida que se avanza en el número de iteraciones de la secuencia global, tornándose más complejo y multivariado.

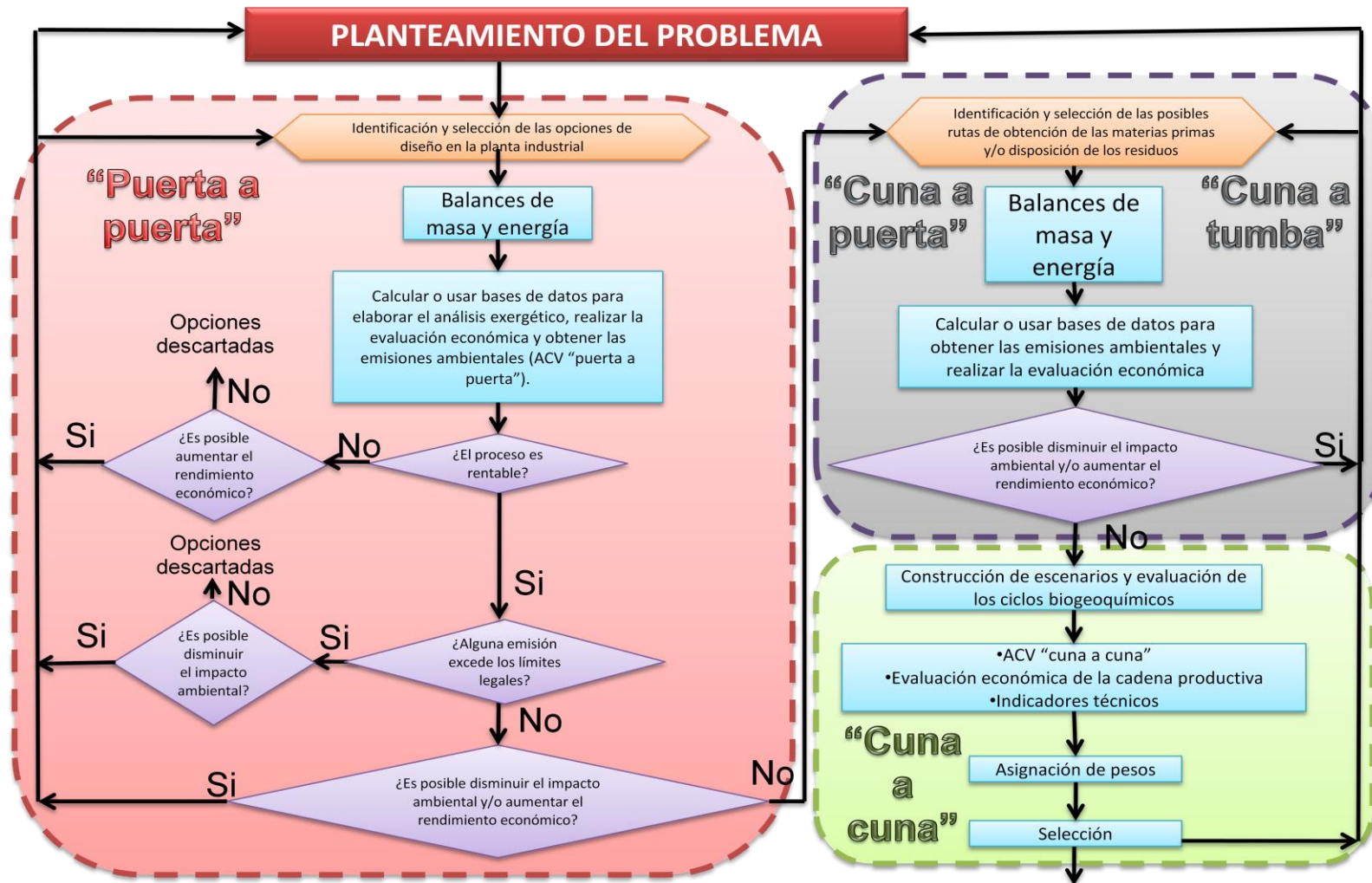


Figura 3. Esquema metodológico de herramienta de toma de decisiones con base en ASP, EE y ACV.

Fuente: La Autora

- Puesto que la herramienta busca construir alternativas de proceso que se encuentren enmarcadas dentro del concepto de desarrollo sostenible, los límites del sistema se expanden a continuación para evaluar la sostenibilidad de la cadena productiva enlazada al proceso. Es lo que se representa en la figura 4. Los indicadores ambientales y de eficiencia a usar dependerán del caso a analizar. En una primera iteración de la secuencia global, luego de que se preseleccionan las alternativas industriales, se incluyen las etapas de obtención de las materias primas; eventualmente también las de uso del producto y disposición de residuos.
- Con la expansión se necesita una evaluación del impacto ambiental más detallada; el ACV “puerta a puerta” solo cuantifica el impacto que se genera en la instalación industrial del producto, pero este no es el único. Se tienen los impactos asociados a la producción de las materias primas, al transporte y al uso del producto y disposición de residuos.
- Ahora se requiere el análisis “puerta a puerta” pero de un proceso industrial ampliado. Esto se consigue involucrando además del proceso de manufactura del producto, la producción de materias primas, pero sin llegar a los orígenes en la naturaleza y a los ciclos biogeológicos²⁷. En la figura 3 parte izquierda y en la figura 4 (“planta”), se representa esta expansión con el perímetro punteado, que simboliza la posible expansión gradual o en un solo paso de la cadena de producción, sin llegar a los orígenes primarios de las materias primas.
- En la misma iteración de la secuencia global se pueden dar varias expansiones y por tanto varias repeticiones con complejidad creciente de la secuencia representada en la parte izquierda de la figura 3 con “plantas” representadas en la figura 4 que van cambiando.

²⁷En el caso de la producción de biodiesel se llega hasta el cultivo en términos de sector económico (tecnología de mecanización, de cosecha, de siembra, etc.), sin involucrar los procesos biogeológicos (fotosíntesis, dinámica de suelos, etc.).

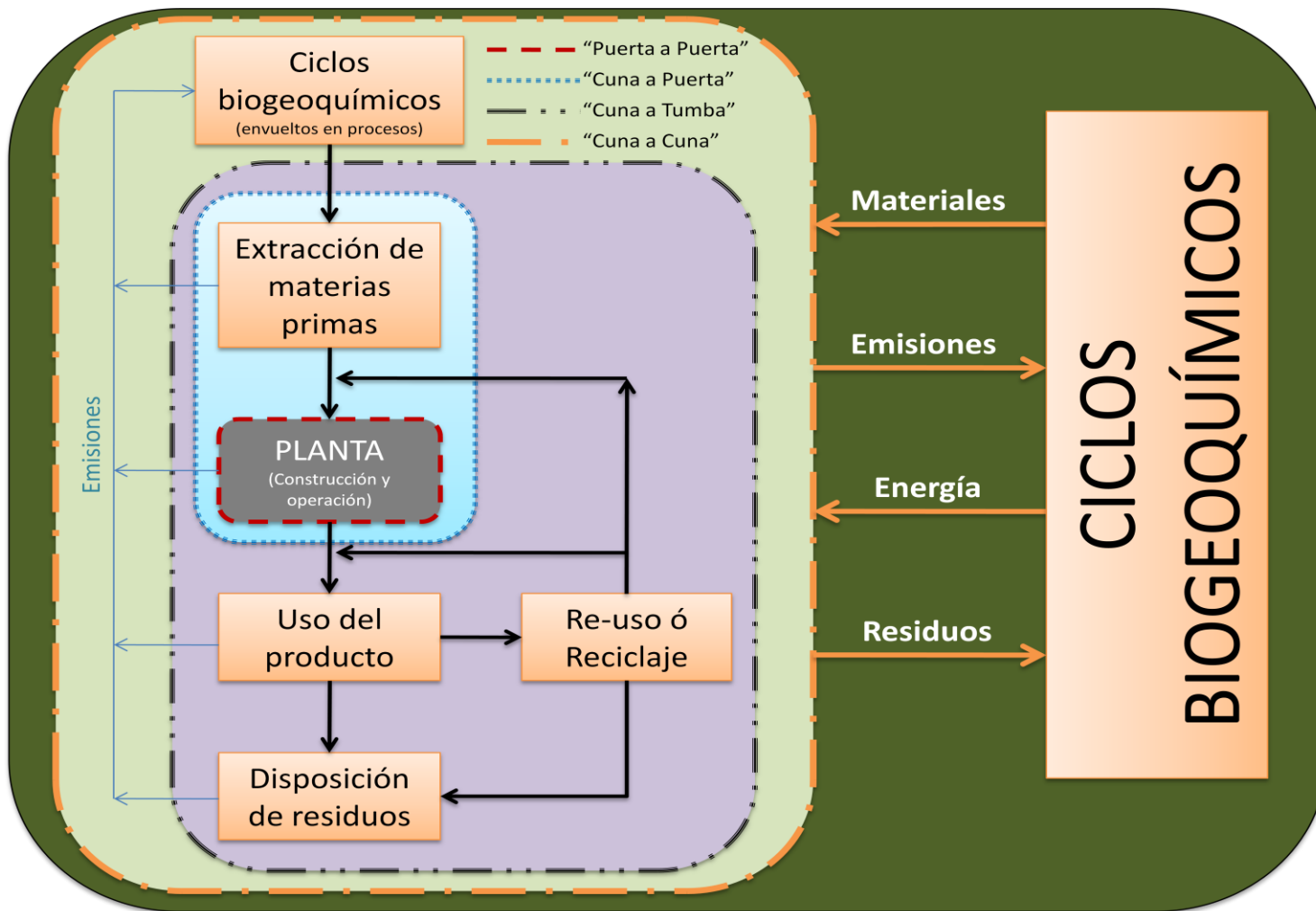


Figura 4. Evolución de los límites del sistema.

Fuente: La Autora

- Se requiere el enfoque “cuna a puerta”, cuando la expansión en la dirección de las materias primas llega hasta sus orígenes primarios en la naturaleza a través de ciclos biogeoquímicos, sin que la expansión hacia los residuos finales del producto lleguen a su descarga en la naturaleza. Corresponde a la selección de fuentes primarias de materias primas, representada con el paso a la parte superior derecha en la figura 3 (sombreado en gris). Al considerar el reciclaje a la parte izquierda es lo que se representa en el recuadro azul de la figura 4. En una iteración de la secuencia global se puede, y generalmente se dan varias iteraciones de lo ahora descrito. Esto se representa con las líneas punteadas, tanto del recuadro azul de la figura 4, como de la parte derecha superior de la figura 3.
- Se requiere el análisis “cuna a tumba” cuando además de llegar a fuentes primarias de insumos se llega también a descargas a la naturaleza, de residuos finales derivadas del uso del producto y/o de la disposición final de los residuos. En términos de la figura 3 corresponde, como a lo descrito en el párrafo anterior, al paso a la parte derecha superior, con reciclajes a la parte izquierda. Pero en términos de la figura 4 el sistema se expande ya hasta lo representado en el recuadro color lila; en una y otra figura el simbolismo de los perímetros planteados significa que la secuencia correspondiente y los reciclajes a la parte izquierda de la figura 3, suelen tener varias iteraciones, dentro de cada iteración de la secuencia global.
- El sistema debe expandirse progresivamente hasta llegar a incluir todas las etapas del ciclo de vida relacionadas (ACV “cuna a cuna”, ver figura 4). Además de las consideraciones ambientales, es necesaria una verificación de que las etapas industriales, extractivas y/o de cultivos necesarias para la obtención de las materias primas sean rentables individualmente para garantizar que las ganancias que se obtienen sean distribuidas de una forma equitativa.

En este orden de ideas los pasos metodológicos que prosiguen son:

- Se parte de análisis “puerta a puerta” siempre que se incluya una nueva etapa de ciclo de vida, pero estos resultados alimentarán etapas posteriores construyendo análisis “cuna a puerta” y “cuna a tumba”.
- Cuando se incluyen los ciclos biogeológicos se cierran los ciclos básicos o algunos de ellos, y se requieren evaluaciones “de la cuna a la cuna”, representadas por el paso a la parte derecha inferior de la figura 3 (sombreado en color verde claro) y a expandir el sistema en análisis representado en la figura 4 hasta el recuadro color verde. De nuevo, los perímetros punteados en las figuras significan que se pueden dar iteraciones múltiples de las secuencias pertinentes dentro de cada iteración de la secuencia global; a su vez el reciclo de información a la parte izquierda de la figura 3, hace visible la posibilidad de varias iteraciones globales para el conjunto de secuencias parciales.
- Recurriendo a bases de datos, documentos técnicos, científicos y simuladores se cuantifican los flujos básicos y energéticos de las alternativas.
- Empleando las metodologías ACV y EE se evaluará la sostenibilidad de las alternativas y si es el caso se propondrán variaciones que aumenten su desempeño tanto económico como ambiental.
- El resultado final es un conjunto de alternativas seleccionadas que no pueden ser mejoradas, todas ellas rentables, ambientalmente sostenibles y eficientes exergéticamente. Una aplicación de selección con criterios jerárquicos o con pesos de las metas y criterios múltiples, llevará a seleccionar la mejor alternativa. Es la etapa de la evaluación para toma de decisiones con los siguientes pasos típicos:
 - ✓ Construcción de los posibles escenarios de aplicación individual o conjunta de las alternativas preseleccionadas.

- ✓ Evaluación de los escenarios empleando ACV “cuna a cuna” para obtener el perfil medioambiental, EE para calcular valor presente neto y tasa interna de retorno de la cadena productiva y, cálculo de los indicadores técnicos de rendimiento relevantes para el sector²⁸.
- ✓ Asignación de pesos a los indicadores por parte de los agentes encargados de tomar las decisiones.
- ✓ Selección de la mejor alternativa luego de calcular un indicador único mediante la aplicación de la metodología “Analytical Hierarchy Process” (AHP).

2.2. MODELOS MATEMÁTICOS

Conceptualmente todo proceso industrial está conformado por las etapas: preparación de las materias primas, transformación de materias primas, etapas de separación y por último procesos de purificación. Para llevar a cabo estos pasos se requiere de energía, la cual se suministra usando los servicios industriales (ver Figura 5).

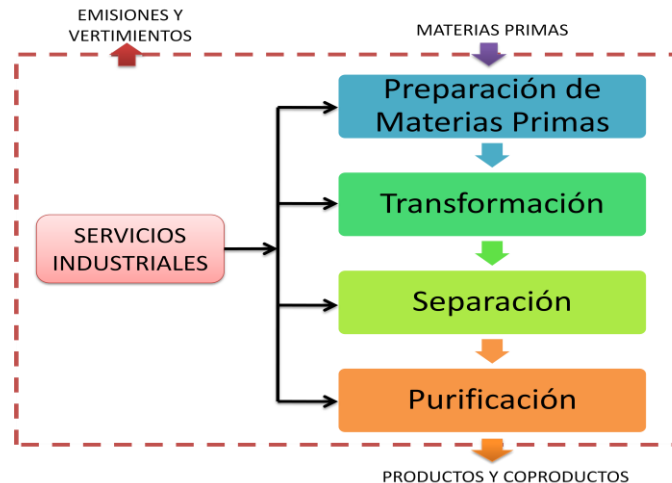


Figura 5. Esquema general de un proceso industrial.

Fuente: La Autora

²⁸ Para biocombustibles los más utilizados son: litros de biocombustible por hectárea de cultivo y energía renovable obtenida por unidad de energía no renovable gastada.

Partiendo de este esquema general a continuación se presentan los modelos de evaluación económica, ambiental y exergética (apartados 2.2.1, 2.2.2. y 2.2.3). En el apartado final (2.2.4) de esta sección se explica brevemente la metodología AHP y se adelantan los factores de peso que se emplearán en los casos de estudio del siguiente capítulo.

2.2.1. Modelo de evaluación económica

La metodología clásica de evaluación de proyectos pasa por el cálculo de la inversión (fija y de trabajo), de valores de salvamento, de los costos e ingresos y utilidades después de impuestos, para tener el diagrama neto de flujo de fondos con el cual se obtienen los indicadores para toma de decisiones: VPN (valor presente neto, típicamente en el año de arranque de la producción), TIR (tasa interna de retorno), TRI (tiempo de recuperación de la inversión) y diferentes índices de sensibilidad o valores de equilibrio. Para el detalle de modelos, ecuaciones y flujo de información pertinente, se remite al lector a los libros, software, modelos, ecuaciones clásicas y al ejemplo que se presentará en detalle en el capítulo sucesivo.

Se centra en este capítulo la atención, en mostrar las ecuaciones principales y hacer visibles aquellas variables que enlazan los balances y flujos de masa y energía, con los de valor o financieros además de con los de impacto ambiental.

En cuanto a inversiones y valor de salvamento se tratan de valores en un determinado momento del tiempo. Los costos e ingresos, aunque se presentan como valores o cantidades de dinero, está implícito que se trata de flujos con la misma base de tiempo (típicamente un año).

Para unos y otros se parte de que el tamaño de planta o capacidad instalada (Q) ya se ha determinado y ésta típicamente se expresa en unidades de producto por año.

Para el cálculo de la inversión fija en EE hasta el nivel de factibilidad se determina con precisión el valor de cada uno de los equipos fundamentales para agregarlos como valor del equipo fundamental y con base en él se estima la inversión fija y la inversión de trabajo. Dado que el tamaño de los equipos es función monótona creciente tanto de la capacidad de la planta como de los flujos másicos y energéticos que se manejen, está implícito que para una capacidad de planta se tienen costos mínimos de equipos y por tanto Inversión física y de trabajo mínimas, cuando es máxima la eficiencia en cuanto a flujos másicos y energéticos.

$$I_f = E L_d L_i \quad (a) \qquad I_w = I_f L_w \quad (b) \qquad I_t = I_f + I_w \quad (c) \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde E es el valor del equipo fundamental, I_f , I_w e I_t son, respectivamente la inversión fija, la inversión de trabajo y la inversión total. L_d es el factor de Lang que multiplicado por el del equipo fundamental da como resultado la inversión directa, L_i es el factor de Lang que multiplicado por el de la inversión directa da como resultado la inversión fija (ya agregadas la inversión directa y la indirecta). L_w es el factor de Lang que multiplicado por la inversión fija da como resultado la inversión de trabajo.

Costos de materias primas (C_{MP}):

$$C_{MP} = \sum_i MP_i P_{MP_i} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde i es un contador de tipos de materias primas, MP_i es la cantidad de la materia prima i usada y P_{MP_i} es el precio unitario de la materia prima i.

Costos de servicios industriales (C_{SI}):

$$C_{SI} = \sum SI_n_{PMP} P_{SI_n} + \sum SI_n_{Tr} P_{SI_n} + \sum SI_n_{Sep} P_{SI_n} + \sum SI_n_{Pu} P_{SI_n} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde n es un contador de servicios, SI_n es la cantidad de servicio industrial n, P_{SI_n} es el precio unitario del servicio industrial n y, los subíndices PMP, T, S y P hacen referencia a las fases: preparación de las materias primas (PMP), transformación (Tr), separación (Sep) y purificación (Pu).

Para determinar con precisión los costos de personal (C_{MO}), se necesitan, por una parte, estudios administrativos y de tiempos y movimientos que lleven a las necesidades de personal de nómina y ocasional con sus diferentes perfiles de competencias y, por otra parte, a estudios de mercado del trabajo. Para EE de proyectos industriales hasta nivel de factibilidad se utilizan métodos que se basan en determinar el número de operarios en función del número y tipo de equipos fundamentales y con base en ellos escalar al total de costos de personal, incluyendo los valores nominales y afectándolos por los correspondientes factores prestacionales que están influidos por la legislación laboral y prestacional. Cuando se tienen estudios detallados de costos de personal para una escala determinada de producción o tamaño de planta, se suele recurrir a la ecuación de potencia con exponente 0,35 o cercano, que suele dar resultados más cercanos a los reales, que el método anteriormente descrito.

$$C_{MO_{Q_2}} = C_{MO_{Q_1}} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0,35} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $C_{MO_{Q_1}}$ y $C_{MO_{Q_2}}$ son respectivamente los costos de mano de obra para el tamaño de planta 1 (aquel conocido por haber sido calculado con detalle) y para el

tamaño de planta 2 (aquel para el cual se estima) y Q_1 y Q_2 son respectivamente los tamaños de planta 1 y 2.

Los costos de mantenimiento (C_M) se calculan en función de la inversión fija:

$$C_M = I_f F_M \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde F_M es un factor para evaluar los costos de mantenimiento que depende de la tecnología.

Costos totales antes de impuestos (C_{Tai}):

$$C_{Tai} = C_{MP} + C_{SI} + C_{MO} + C_M F_a \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde F_a es un factor de ajuste para tener en cuenta otros costos diferentes a los cuatro ya incluidos en el paréntesis.

Ingresos (Y):

$$Y = \sum_m Pr_m P_{Pr_m} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde, Pr_m es la cantidad de producto m obtenida y P_{Pr_m} es el precio unitario del producto m .

Costos totales después de impuestos (C_{Tdi}):

$$C_{Tdi} = C_{Tai} + I_T F_{IP} + Y - C_{Tai} F_{IG} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde factores F_{IP} y F_{IG} representan las tasas de impuestos al patrimonio y a las ganancias respectivamente.

Utilidades (U):

$$U = Y - C_{Tdi} \quad \text{Ecuación 9}$$

Combinando las ecuaciones de la (1) a la (9) se pueden calcular las utilidades de cada año, para proceder luego al cálculo de indicadores de rentabilidad, uno de los cuales es el valor presente neto.

$$VPN_x = \sum_0^x U_i \left(\frac{P}{F} \right)_i - I_t \cdot 1 - F_{StoX} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde VPN_x es el Valor presente del proyecto en el momento de iniciar operaciones, cuando se llevan x años de operación, U_i son las utilidades del año i, $(P/F)_i$ es el factor de matemáticas financieras para calcular el valor presente a partir de un valor final del año i y F_{StoX} es el valor presente del valor de salvamento en el año x. El valor de salvamento de cada año se calcula con base en la inversión y su depreciación que suele depender de la legislación.

2.2.2. Modelo de evaluación ambiental

Siguiendo un procedimiento similar al usado para el desarrollo del modelo económico se desarrolló el modelo ambiental.

Impacto ambiental potencial generado por las emisiones y vertimientos de la planta industrial (I_P):

$$I_P = \sum EV_i \cdot I_{EV_i} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde, EV_i es la cantidad de emisión o vertimiento i y I_{EV_i} es el impacto ambiental potencial por unidad de emisión o vertimiento i.

Impacto ambiental potencial de los servicios industriales I_{SI} :

$$I_{SI} = \sum_n SI_n \cdot I_{SI_n}^{PMP} + \sum_n SI_n \cdot I_{SI_n}^{Tr} + \sum_n SI_n \cdot I_{SI_n}^{Sep} + \sum_n SI_n \cdot I_{SI_n}^{Pu} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde, SI_n es la cantidad de servicio industrial n, I_{SI_n} es el impacto ambiental potencial por unidad de servicio industrial n y, los subíndices PMP, T, S y P hacen

referencia a las fases: preparación de las materias primas (PMP), transformación (Tr), separación (Sep) y purificación (Pu).

Impacto ambiental potencial de las materias primas (I_{MP}):

$$I_{MP} = \sum_i MP_i I_{MP_i} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde, MP_i es la cantidad de la materia prima i usada y I_{MP_i} es el impacto ambiental potencial por unidad de materia prima i .

Impacto ambiental potencial de la construcción de la planta (I_{CP}):

$$I_{CP} = f(\text{tecnología, localización, etc.}) \quad \text{Ecuación 14}$$

Con el nacimiento del concepto “life cycle thinking”, se introdujo en las evaluaciones ambientales la etapa del uso del producto (Heiskanen, 2002).

Impacto ambiental potencial del uso de los productos (I_{UP}):

$$I_{UP} = \sum_y Pr_y I_{Pr_y} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde, Pr_y es la cantidad de producto y obtenida, y I_{Pr_y} es el impacto ambiental potencial por unidad de producto y .

Por último, debido al desarrollo de alternativas de producción que incluyen bioprocesos y a la promoción internacional que se ha dado al uso de recursos renovables, se hace necesaria la inclusión de los impactos ambientales de los ciclos biogeoquímicos envueltos en las etapas productivas (I_{CB}), que dependiendo del caso toman valores positivos o negativos²⁹:

$$I_{CB} = f(\text{tipo de ciclo, localización, etc.}) \quad \text{Ecuación 16}$$

²⁹Un impacto ambiental con signo negativo se considera beneficio ambiental.

Sumando los impactos descritos en (11), (12), (13), (14) y (15), se obtiene la expresión del impacto ambiental total (I_T):

$$I_T = I_P + I_{SI} + I_{MP} + I_{CP} + I_{UP} + I_{CB}$$

The diagram illustrates the decomposition of the total environmental impact (I_T) into six components: I_P , I_{SI} , I_{MP} , I_{CP} , I_{UP} , and I_{CB} . These components are grouped into four categories of environmental impact (ACV):

- ACV "puerta a puerta"**: Includes I_P .
- ACV "cuna a puerta"**: Includes I_{SI} , I_{MP} , and I_{CP} .
- ACV "cuna a tumba"**: Includes I_{UP} .
- ACV "cuna a cuna"**: Includes I_{CB} .

Ecuación 17

Analizando las expresiones (1) a la (17), se evidencia que optimizando el uso de materias primas y recursos energéticos es posible aumentar el rendimiento económico y al mismo tiempo disminuir el impacto ambiental de una tecnología. Una metodología que permite evaluar el aprovechamiento de materias primas y recursos energéticos en plantas industriales es el análisis exergético.

2.2.3. Metodología de evaluación exergética

Los conceptos de exergía han sido aplicados a conversión de energía, optimización de procesos, diagnóstico, análisis de sistemas complejos y análisis de sostenibilidad, entre otros. La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo útil que puede obtenerse de un sistema por intercambio de materia y energía con el medio a través de un proceso reversible (Yang *et al.* 2006, Sciubba y Wall 2007), dicho de otra manera, la exergía es la porción de energía que es enteramente convertible en otras formas de energía.

Cualquier corriente de materia, calor o trabajo puede ser asociado con un contenido exergético, el cual es definido por T , P y x de la corriente y del estado

de referencia, el cual normalmente es el ambiente en el cual el sistema opera (Sorin *et al.* 1998).

De acuerdo con Sorin *et al.* 1998, es posible calcular los contenidos de exergía de todas las corrientes de entrada y salida de un sistema y establecer su balance exergético global. Sin embargo, el total de exergía de entrada de un sistema real es siempre más alta que la exergía de salida, debido a que hay una cierta cantidad de exergía que es destruida de manera irreversible dentro del sistema. Esta exergía, hace referencia a las pérdidas de exergía interna y está directamente relacionada con las irreversibilidades termodinámicas del sistema. Un balance exergético, por definición, solo existe para procesos reversibles. Así, para procesos reales en los cuales las irreversibilidades son mayores que cero, la exergía nunca está en balance (Wall 1988).

Es importante distinguir entre la exergía destruida por las irreversibilidades y la exergía desechada debido a exergía no usada en el proceso. Ambas representan pérdidas de exergía, pero las irreversibilidades, por definición, no tienen exergía ni efectos ambientales (Akkaya *et al.* 2007).

Con el cálculo de pérdidas exergéticas (por ejemplo, destrucción y desecho), es posible visualizar las mejoras en los procesos. Generalmente, cuando las pérdidas exergéticas son altas, podemos considerar mejorar primero esa parte del proceso; sin embargo, cada parte del sistema tiene una dependencia de las demás, así que una mejora en una parte puede incrementar las pérdidas en otras, generando iguales o mayores pérdidas exergéticas en el proceso modificado que en la configuración original (Gong y Wall 1997).

La ecuación (18) describe el balance exergético para estado estacionario:

$$E_d = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j} \right) Q_j - \sum W + \sum_e m_e e_e - \sum_s m_s e_s \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde, E_d es la exergía destruida, el primer término de la ecuación corresponde a la exergía debida al flujo de calor, el segundo es el trabajo al y desde el sistema, y los dos últimos términos hacen referencia a las exergías de las corrientes másicas que entran y salen del sistema.

La exergía de una corriente material está constituida por su exergía física y química, así como las pérdidas exergéticas debido a la mezcla de sustancias (en caso de corrientes multi- componentes). La exergía física de un flujo material puede ser escrita como se muestra en la ecuación (19).

$$E_{fis} = H - H_o - T_o (S - S_o) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde, H es la entalpía, S la entropía y T la temperatura.

La exergía química de una sustancia es el máximo trabajo útil que puede ser producido por el proceso de equilibrio químico y físico de la sustancia con el ambiente. De acuerdo con Trubaev 2006, las exergías químicas y termomecánicas pueden ser calculadas a partir de los datos termodinámicos de la sustancia.

La exergía química de varios combustibles puede ser evaluada apropiadamente si se conoce la composición elemental, usando las correlaciones propuestas por Szargut *et al.* 1988. En el caso de biomasa, la exergía química puede calcularse empleando las correlaciones para combustibles con el valor calórico neto o LHV (*lower heating value*), y las fracciones másicas de los materiales orgánicos, sulfuros, agua y ceniza presentes en la biomasa (ecuación 20) (Ptasinski *et al.* 2007).

$$E_{CH_{total}} = w_{org} \beta LHV_{org} + w_S E_{CH_S} - C_S + w_{agua} E_{CH_{agua}} + w_{ceniza} E_{CH_{ceniza}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde, $E_{CHtotal}$ es la exergía química (kJ/kg), w la fracción másica, LHV_{org} el valor calorífico inferior de la fracción orgánica por kilogramo (kJ/kg org.fr.), β la relación entre la exergía química y el LHV de la sustancia orgánica seca (adimensional) y C_S el valor calorífico del sulfuro (kJ/kg).

El factor β puede calcularse usando las correlaciones estadísticas desarrolladas por Szargut y Styrylska 1964 y a lo reportado por Hepbasli 2007 (ecuación 21).

$$\beta = \frac{1.042 + 0.2160 \left(\frac{w_{H_2}}{w_c} \right) - 0.2499 \left(\frac{w_{O_2}}{w_c} \right) \left[1 + 0.7884 \left(\frac{w_{H_2}}{w_c} \right) \right] + 0.045 \left(\frac{w_{N_2}}{w_c} \right)}{1 - 0.3035 \left(\frac{w_{O_2}}{w_c} \right)} \quad \text{Ecuación 21}$$

La exergía estándar de muchos compuestos está disponible en la literatura (Utlu y Hepbasli 2008, Ayres y Ayres 1999). Cuando no puede ser hallada, ésta puede ser calculada para cualquier sustancia pura utilizando su energía libre de Gibbs de formación.

De igual manera, las pérdidas exergéticas debido a la mezcla de sustancias deben ser consideradas para el cálculo de la exergía química de las corrientes. Generalmente, estas pueden ser calculadas mediante la ecuación (22) (Ojeda y Kafarov 2009).

$$E_{CH_{mix}} = \sum_i y_i E_{CH_i} + RT_0 y_i \ln y_i \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde, E_{CH_i} es la exergía química estándar de la sustancia i , R la constante de los gases ideales, T_0 la temperatura referencia y y_i la fracción molar de la sustancia i .

La metodología de análisis exergético propuesta por Rodorea 2005 propone: primero dividir el sistema bajo estudio en volúmenes de control (en un proceso

industrial la división es por equipos), calcular los flujos de exergía y la destrucción de la misma en cada equipo, evaluar la eficiencia exergética en cada equipo empleando la expresión (23), elaborar un diagrama de flujo exergético y con él, localizar los sumideros de exergía en el proceso.

Se define la eficiencia exergética ε como la proporción entre el producto (E_p) y el recurso (E_r) de un sistema expresados en términos de la exergía, como se presenta en la ecuación (23).

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E_r} \quad \text{Ecuación 23}$$

Es importante tener en cuenta que la exergía del recurso no es necesariamente la suma de toda la exergía que entra o que sale del sistema. La tabla 2 enseña la forma en que se evalúa la eficiencia exergética de algunos equipos.

Tabla 2. Expresiones para la evaluación de la eficiencia exergética de bombas, intercambiadores de calor y enfriadores.

EQUIPO	EFICIENCIA EXERGÉTICA	
BOMBA	$\varepsilon = \frac{E2 - E1}{W}$	E1 = Flujo de exergía a la entrada. E2 = Flujo de exergía a la salida. W = Potencia de la bomba
INTERC. DE CALOR	$\varepsilon = \frac{E4f - E3f}{E1c - E2c}$	E1c = Flujo de exergía de la corriente caliente que entra. E2c = Flujo de exergía de la corriente caliente que sale. E4f = Flujo de exergía de la corriente fría que sale. E3f = Flujo de exergía de la corriente fría que entra.
ENFRIADOR	$\varepsilon = 0$	La eficiencia es cero, debido a que su objetivo es disipar calor sin obtener ningún producto.

Fuente: Moran *et al.* 2010.

De la misma manera, la eficiencia técnica de un mezclador viene dada por la expresión (24). La figura 6 presenta el esquema del equipo.

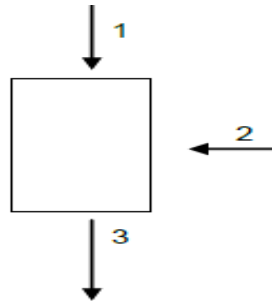


Figura 6. Esquema de un mezclador.

Fuente: La Autora.

$$\varepsilon = \frac{m_2}{m_1} \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_3} \quad \text{Ecuación 24}$$

La tabla 3, contiene las expresiones de eficiencia exergética para separadores, columnas de extracción y columnas de destilación.

Tabla 3. Esquema y expresiones para la eficiencia exergética de separadores, columnas de extracción y columnas de destilación.

SEPARADOR		$\varepsilon = \frac{(E_2 + E_3 + E_4)}{E_1}$ $\varepsilon = \frac{E_{\text{producto deseado}}}{E_1}$
COLUMNA DE EXTRACCIÓN		$\varepsilon = \frac{(E_3 + E_4)}{(E_1 + E_2)}$ $\varepsilon = \frac{E_{\text{producto deseado}}}{(E_1 + E_2)}$
COLUMNA DE DESTILACIÓN		$\varepsilon = \frac{(E_2 + E_3 + E_{Q2})}{(E_1 + E_{Q3})}$ $\varepsilon = \frac{E_{\text{producto deseado}}}{(E_1 + E_{Q3})}$

Fuente: Sierra y Casas, 2011.

2.2.4. Metodología AHP

Cuando existe la necesidad de evaluar diferentes alternativas basándose en varios y diversos criterios la conexión con metodologías de decisión mediante análisis multi criterio (MCDA, por su sigla en inglés, multi criteria decision analysis) es inmediata. Existe un gran número de metodologías de este tipo y para seleccionar una de ellas es necesario tener en cuenta el tipo de problema que intentamos resolver. Una de las metodologías MCDA más utilizada es AHP la cual fue desarrollada por Thomas Saaty (Saaty 1980).

El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente organizar la información respecto de un problema de decisión, descomponerla y analizar por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar.

Este proceso se fundamenta en varias etapas. La formulación del problema de decisión en una estructura jerárquica es la primera y principal etapa. En esta etapa es en la que el decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes; meta u objetivo general, criterios y alternativas.

En el caso de estudio objeto de esta tesis, la meta u objetivo general es identificar las mejores opciones para producir biodiesel en Colombia. Los criterios que se incluyen en el proceso de toma de decisiones son: ambiental, económico y técnico. Cada alternativa u escenario construido está evaluado en estos términos mediante el uso de unos sub indicadores de criterio. La estructura jerárquica a analizar es la presentada en la figura 7.

Los valores en paréntesis que acompañan los sub indicadores son los pesos porcentuales para la evaluación del criterio. Cada sub indicador obtendrá una calificación de 0 a 1 (donde 1 corresponde a la mejor calificación, cero a la peor y

las intermedias varían entre cero y uno como una función lineal³⁰) que luego será ponderada con los pesos porcentuales para sacar la calificación por criterio. Las ecuaciones (25), (26) y (27), especifican la forma de calcular la calificación ponderada para cada criterio.

$$C_{Ambiental} = C_{cambioclimático} \cdot 0,4 + C_{acidificación} \cdot 0,2 + C_{eutrofización} \cdot 0,2 + C_{Form.oxi.fotoquim.} \cdot 0,1 + C_{efectosresp.} \cdot 0,1 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$C_{Económico} = C_{VPNverosímil} \cdot 1 \quad \text{Ecuación 26}$$

$$C_{Técnico} = C_{Prod.biod.porHa} \cdot 0,5 + C_{ERporENR} \cdot 0,5 \quad \text{Ecuación 27}$$

Para la selección de la mejor alternativa se asigna el mismo peso a cada criterio (ambiental, económico y técnico) y la mejor alternativa será la que obtenga mayor puntaje luego de calcular la calificación global (C_{Global}) usando la ecuación (28):

$$C_{Global} = C_{Ambiental} + C_{Económico} + C_{Técnico} \quad \text{Ecuación 28}$$

El máximo valor que puede tomar C_{Global} es 3, y el mínimo 0.

2.3. EL EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para aplicar la metodología descrita al problema general escogido de producir biodiesel de una manera sostenible en Colombia se propone iniciar con la identificación y selección de las alternativas tecnológicas para producir biodiesel de palma o higuerrilla con un tamaño de planta de 80.000 toneladas por año. Se fija esta base de cálculo con el objeto de facilitar la comparación de alternativas y porque es un tamaño de planta promedio partiendo de estas dos materias primas.

³⁰Es exactamente igual a cuando en el manejo de datos estadísticos, se normaliza una variable (X) que cambia entre a (valor mínimo) y b (valor máximo); la variable normalizada (x), se define como $x = a + (X-a)/(b-a)$

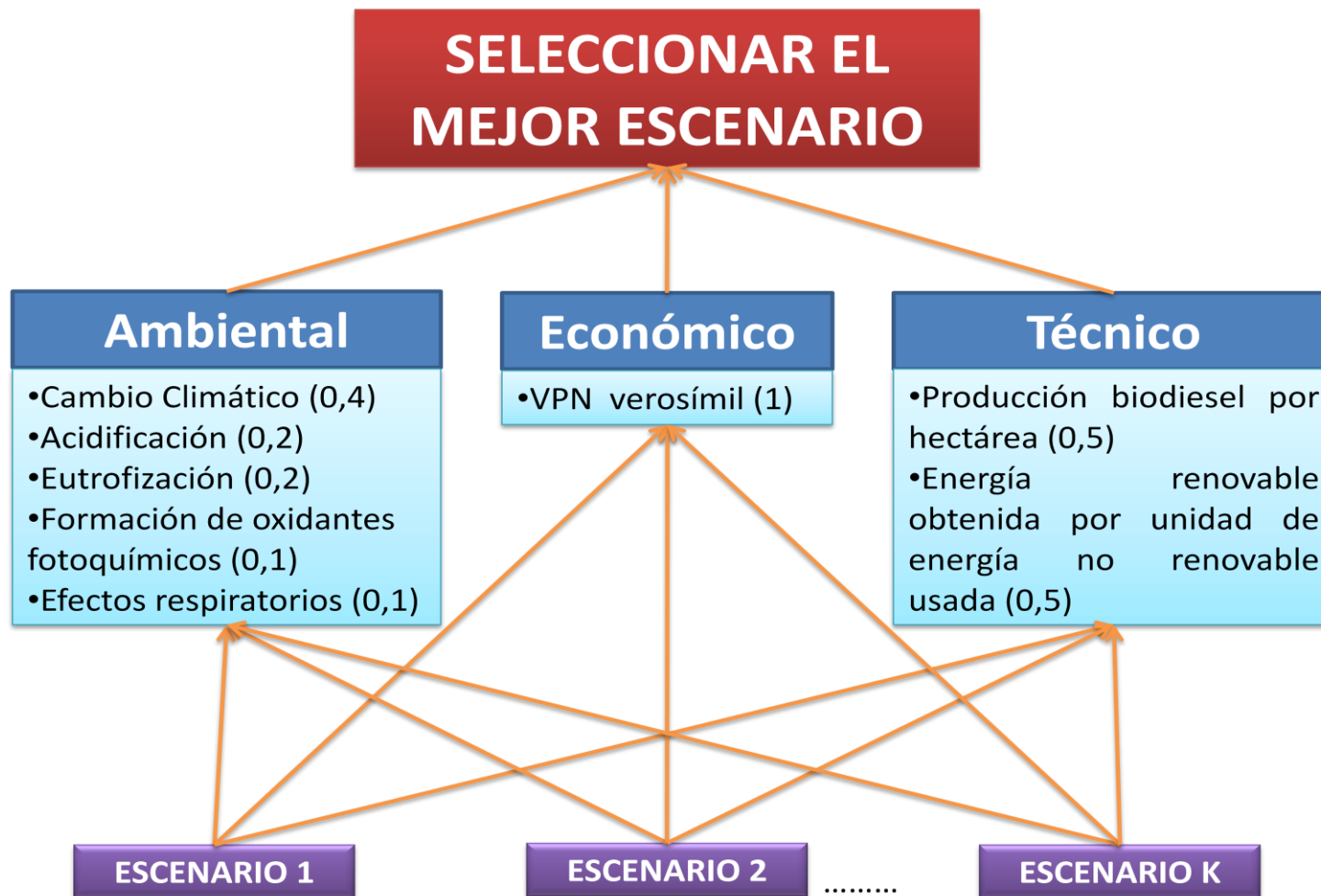


Figura 7. Estructura jerárquica para toma de decisiones.

Fuente: La Autora

Teniendo como datos de entrada, el tamaño y la tecnología se procede entonces a la construcción de los balances másicos y energéticos para las alternativas de producción de biodiesel. Estos balances sirven para conocer la calidad del biodiesel y la cantidad y calidad de aceite requerido.

Estos datos a su vez se convierten en información de entrada para las etapas de uso del biodiesel y extracción del aceite.

Conociendo la calidad y cantidad de aceite que se necesita para la etapa de producción de biodiesel, se identifican las alternativas tecnológicas posibles para su obtención. Nuevamente para cada alternativa tecnológica se realizan los balances másicos y energéticos, y posteriormente se evalúa la viabilidad económica de las alternativas, así como su impacto ambiental. Las alternativas que no sean viables económicamente se descartan porque para garantizar la sostenibilidad es necesario que cada eslabón de la cadena productiva sea rentable por sí mismo.

De los balances de la etapa de extracción se toma el dato de cantidad de racimos de fruta fresca (caso de aceite de palma) y cantidad de semillas (caso de la higerilla) para estimar el área requerida para cultivo y realizar los balances que permitirán estimar los impactos ambientales que se generan. Aquí adicional a los balances de los insumos y trabajos agrícolas, se adicionan flujos procedentes por el cambio del uso del suelo y su restauración luego del tiempo de vida previsto en la evaluación.

La Figura 8 presenta en forma gráfica lo descrito en los párrafos anteriores.

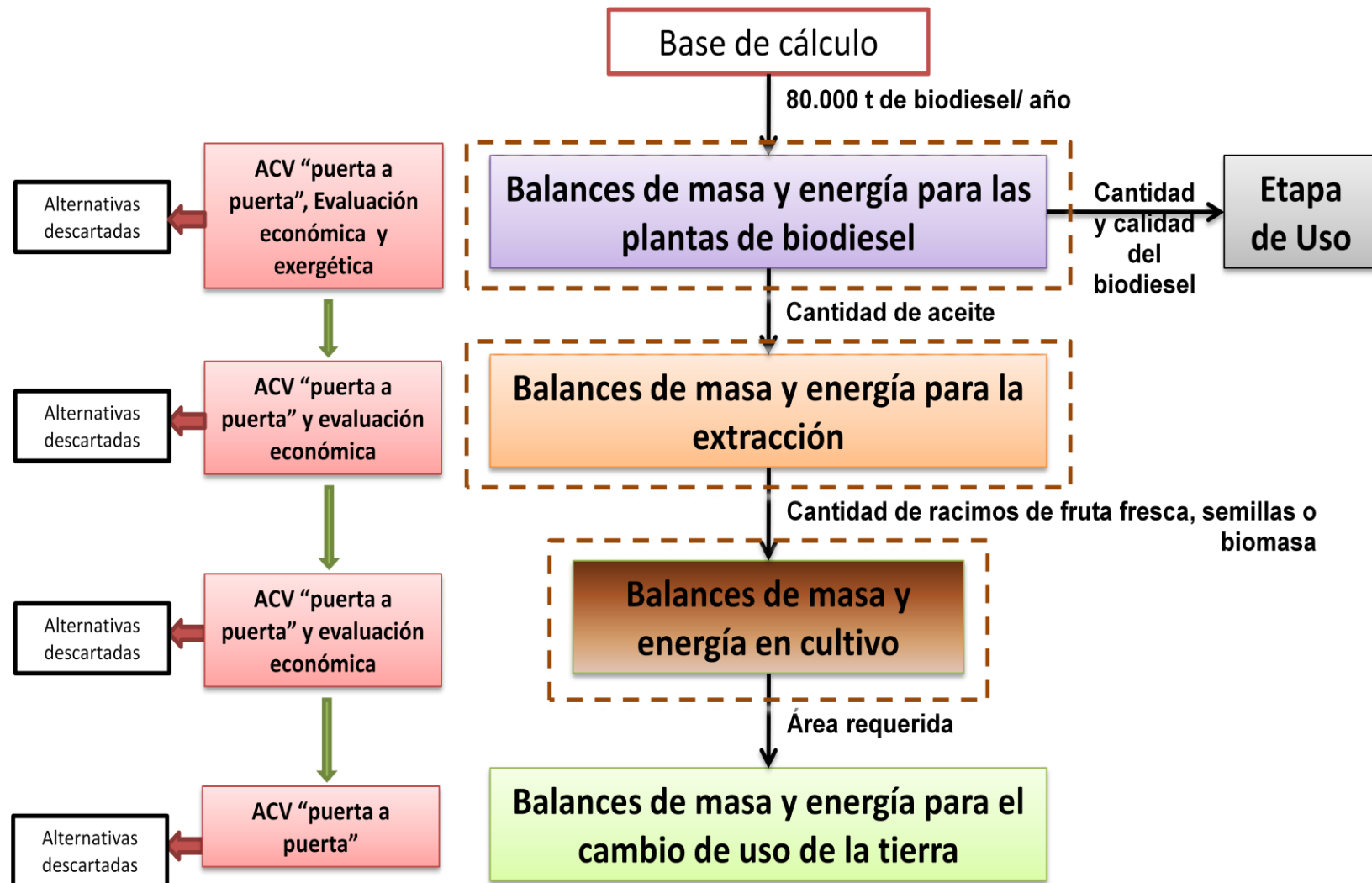


Figura 8. Flujo de información del modelo de evaluación.

Fuente: La Autora.

3. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior, tomando como ejemplo ilustrativo de problema general la producción de biodiesel de manera sostenible en Colombia.

El capítulo inicia con el planteamiento del problema primario, sigue con identificar alternativas viables técnica, económica y ambientalmente para la etapa industrial, luego el sistema se expande para incluir las etapas de producción de materias primas y uso del producto y, finalmente se construirán escenarios “cuna a cuna” con las alternativas anteriormente seleccionadas para las etapas del ciclo de vida del biodiesel. Se cuantifican los indicadores ambientales, económicos y técnicos globales para cada escenario y, se seleccionan los mejores escenarios usando la metodología para toma de decisiones multicriterio AHP.

Los resultados se presentan y analizan en términos de la validez de la metodología y de los indicadores técnicos, económicos y ambientales que se obtienen con ella.

Como se muestra a través del capítulo, aplicando la metodología presentada, se llega finalmente a seleccionar como mejores las alternativas que efectivamente se están aplicando en Colombia y a indicadores técnicos, económicos y ambientales para compararlas y clasificarlas según su favorabilidad.

Así mismo, la secuencia metodológica lleva a que el número de alternativas se vaya reduciendo en forma drástica y al final solo se recorre toda la metodología para biodiesel de aceite de palma con metanol, usando NaOH como catalizador, con el Magdalena Medio como escenario de cultivo y frente a las alternativas del

mercado interno y externo. Es el único caso que se presenta en detalle; además porque dada la complejidad de cada ejercicio, el volumen de cálculos, gráficos, simulaciones, tablas de datos y de resultados exigiría un documento innecesariamente extenso y repetitivo.

No obstante, en la primera parte de la metodología (la que tiene que ver con “planta”), limitándose a la producción del biodiesel a partir de aceite y por tanto con ACV “puerta a puerta”, se desarrollaron con ASP que incluyeron análisis exergético, dos casos más: biodiesel de aceite de palma con etanol usando sulfato de zirconio (catalizador ácido y heterogéneo) como catalizador y biodiesel de aceite de higuera con metanol empleando NaOH como catalizador. Estos dos casos de estudio también se presentan con algún detalle, a título ilustrativo, aunque sin pasar a la expansión del proceso descrito en la figura 3, por cuanto la EE lleva a concluir que con aceite de higuera no es rentable producir biodiesel y lo mismo ocurre con ésta alternativa con aceite de palma.

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA PRIMARIO

Colombia dentro de su plan nacional de desarrollo (PND) 2006-2010 estableció las medidas necesarias para mejorar el diesel que se consume en el país e identificó a los biocombustibles como uno de los productos de alto valor con los cuales se puede diversificar la producción agropecuaria. Adicionalmente, el PND estableció que en todo el país la gasolina debe contener 10% de alcohol carburante y el diesel 5% de biodiesel, porcentajes que se aumentarán gradualmente en años posteriores a medida que aumente la producción nacional de estos dos biocombustibles.

La obtención de biocombustibles ha estado ligada a la búsqueda de materias primas que optimicen la eficiencia energética de los procesos productivos. En el mundo, la producción de biodiesel experimentó un crecimiento de 525% entre los

años 2000 y 2006. Estudios realizados por la unidad de planeación minero energética (UPME) encontraron que Colombia también sigue esta tendencia mundial pues el consumo de combustibles muestra una fuerte dieselización. Debido a que los más altos rendimientos de conversión se alcanzan con palma de aceite, Colombia inició a producir biodiesel industrialmente a partir de esta materia prima, en el 2008. Sin embargo, la elaboración de biodiesel a nivel mundial es principalmente a partir de colza (84%) y girasol (13%), european biodiesel board 2007³¹.

Iniciativas como el documento conpes 3510 promueven la producción sostenible de biocombustibles en Colombia para aprovechar las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los mercados emergentes (nacional e internacional) de los biocombustibles. Las metas son: expandir los cultivos de biomasa y diversificar la canasta energética, pero cumpliendo con los requerimientos de sostenibilidad económica, social y ambiental impuestos por los mercados internacionales.

Una contribución positiva de la producción y uso de biocombustibles depende en gran medida de criterios ambientales relacionados con la localización de las actividades productivas (uso de los terrenos y/o de los paquetes tecnológicos aplicados) y de los impactos ambientales de los proyectos de inversión en cada una de las fases de la cadena productiva (ciclo de vida) de los biocombustibles (cultivo, extracción, producción-transformación, transporte, almacenamiento, distribución y consumo).

El problema replanteado consiste en evaluar rendimiento económico, emisiones y mitigación de emisiones de diferentes biocombustibles, tomando en cuenta en este análisis los ciclos completos de los proyectos y los balances globales,

³¹ <http://www.ebb-eu.org/biodiesel.php>

comparándolos con la línea base de los combustibles tradicionales. A su vez, es necesario evaluar si determinados biocombustibles consumen más energía en su producción que la que se obtiene durante su uso y si cada eslabón de la cadena productiva asociada a su producción es viable económicamente³².

3.2. RECORRIDOS INICIALES EN LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

En el planteamiento inicial de alternativas para la etapa de producción de biodiesel se tuvieron en cuenta ocho materias primas oleaginosas (aceites de palma, higuierilla, soya, colza, ajonjolí, oliva, usados, animales), dos alcoholes (metanol y etanol), dos tipos de catalizador (ácido y básico³³), dos tipos de catálisis (homogénea y heterogénea); da un total de 64 combinaciones posibles.

Para la etapa de preparación de las materias primas se consideraron entre dos y tres alternativas (por ejemplo extracción por prensado, por solvente o combinadas, sin que cada tipo de solvente se considere como alternativa diferente³⁴); para la selección de tecnologías de cultivo se consideraron dos alternativas calificadas genéricamente como mecanizada y no mecanizada³⁵, para selección del terreno (o espacio) de cultivo se consideraron en cada caso entre cinco y seis posibilidades de interés³⁶; se calcula, entonces que hay un mínimo de 1280 y un máximo de 2304 combinaciones.

³²Se podría adoptar como criterio que el conjunto de los eslabones fuese productivo y metodológicamente no habría mayores problemas; no obstante se escogió el criterio de que cada eslabón sea rentable, en primer lugar por cuanto es un criterio más exigente y, en segundo lugar, porque en la práctica lo frecuente y casi generalizado es que cada eslabón es afrontado, administrado y operado por un diferente agente económico o, excepcionalmente, por un mismo agente económico (integración vertical), pero en unidades empresariales y con personería jurídicas diferentes.

³³Para efectos del presente trabajo se parte de que el mejor catalizador ácido y el mejor catalizador básico ya han sido escogidos para cada materia prima y se disminuye así el número de combinaciones.

³⁴Al considerar las alternativas de solventes como una variable más sería mayor la denominada "explosión" de combinaciones posibles.

³⁵También en esta etapa se podría ampliar el número de alternativas si incluyen como variables las opciones de agricultura mecanizada y las diferentes prácticas de la agricultura no mecanizada.

³⁶Tanto para decisiones regionales o locales, como para las de ámbito nacional, muy seguramente conviene una más fina identificación y caracterización de escenarios que llevaría a mayor número de alternativas.

En los primeros recorridos por la secuencia metodológica de la parte izquierda de la figura 3, solo con la etapa de obtención del biodiesel a partir de aceites, a niveles bajos de complejidad y de información, aplicando incluso solo criterios muy generales de exclusión³⁷, se llega ya a una selección inicial de las mejores alternativas de materias primas: aceite de palma y aceite de higuera³⁸; sobreviven en teoría entre 320 y 384 combinaciones.

3.2.1. Herramienta aplicada a producción de biodiesel con aceite de higuera

Sobrevive la higuera como materia prima potencial para biodiesel, por cuanto podría ser sembrada en Colombia, país cuyo territorio tiene topografía o terrenos quebrados en una gran proporción y con diversidad de pisos climáticos, mientras los cultivos de palma africana tienen buenos rendimientos en tierras planas y por debajo de 1.000 m.s.n.m. Otro motivo es porque se considera que no se compete con la seguridad alimentaria, dado que el aceite de higuera no es comestible³⁹.

Con el aceite de higuera como materia prima para el biodiesel, se aplicó parcialmente la metodología (sin ACV y el ASP sin análisis exergético) a nivel de la etapa de extracción del aceite y con base en múltiples trabajos previos se

³⁷Diferentes filtros dejan por fuera seis de las ocho materias primas para biodiesel: sobretodo por insuficientes para el tamaño del problema los aceites usados; por obvia desventaja económica y ecológica (en el sentido de no contar con ecosistemas con ventaja comparativa para su cultivo los aceites de soya, ajonjolí, oliva, por ejemplo) y por altas incertidumbres tecnológicas aún existentes (el aceite de algas, micro algas y los aceites animales).

³⁸Como soporte de la presente investigación, como información para los primeros recorridos de la metodología, se elaboraron (dentro del grupo de investigación CIDES de la UIS, algunos dirigidos por la autora), como trabajos de grado de pregrado y de maestría, e incluso tesis doctorales, ASP, ACV y EE para producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas. También se examinaron otros del mismo tipo, elaborados en Colombia, otros países de Suramérica, Centroamérica, Europa y Asia para otros aceites.

³⁹Este planteamiento merece análisis detallado por cuanto la competencia con la producción de alimentos se da en el destino que se le da a los suelos y en tal sentido destinar tierra a producir aceite de higuera, puede significar que menos suelos se destinan a producir comida. En parte se puede defender el planteamiento, en cuanto sea defendible que se destina a producir higuera algunos terrenos donde no es viable o no es ventajoso producir alimentos.

concluye que la tecnología conveniente es la combinación de prensado y extracción por solvente⁴⁰.

También con el aceite de higuera, pero a nivel de la planta para producción del biodiesel, se adelantaron estudios comparativos de ASP sin análisis exergético y ACV para las siguientes combinaciones⁴¹:

- Aceite de higuera con metanol y catálisis básica homogénea. Localización geográfica: llanos orientales colombianos (Amaya y Becerra 2008).
- Aceite de higuera con metanol y catálisis ácida heterogénea. Localización geográfica: eje cafetero colombiano (Castro y Figueroa 2009).
- Aceite de higuera con etanol y catálisis ácida homogénea. Localización geográfica: eje cafetero colombiano (González y Vargas 2009).
- Aceite de higuera con metanol y catálisis ácida homogénea. Localización geográfica: Sabana de Torres (Gómez y Zurique 2009).

Finalmente se recorrió la metodología completa descrita en la parte izquierda de la figura 3, al caso de transesterificación con metanol y catalizador básico homogéneo, incluyendo el análisis exergético en el ASP (ver presentación del caso en el numeral 3.3.3).

La diferencia mayor con respecto a los estudios descritos en el párrafo anterior es que se incluye la EE con un buen nivel de detalle y es este componente el que lleva a descartar las alternativas con aceite de higuera.

⁴⁰En la UIS hay una larga tradición de investigación y desarrollo tecnológico con el aceite de higuera como materia prima y se han desarrollado numerosos estudios que combinan ASP y EE para producir aceite y algunos de sus derivados. Específicamente, para producir aceite los estudios, por una parte han concluido algunos hasta en montaje y operación de las correspondientes plantas industriales y, por otra parte se han evaluado comparativamente las tecnologías disponibles y se ha cubierto con los estudios un amplio intervalo de tamaños de planta y localizaciones de planta en Colombia.

⁴¹En el período en que se adelantaron los estudios descritos se concentró el esfuerzo en integrar el ASP con el ACV y en desarrollar y perfeccionar la aplicación a biodiesel del paradigma “de la cuna a la cuna”; en el sentido metodológico fueron útiles.

En efecto, con el análisis completo se concluye que producir biodiesel a partir de aceite de higuera en un proceso con metanol, con catalizador ácido y catálisis homogénea no es rentable.

Se complementa este estudio con otros (usando etanol, otros catalizadores, con catálisis heterogénea) y se concluye cualitativamente en algunos casos, comparando resultados cuantitativos en otros casos, que las combinaciones diferentes a la estudiada en detalle son menos rentables por, a título de ejemplos, exigir notables incrementos de la inversión por menores velocidades de reacción, mayores relaciones de reciclo y mayores exigencias de operaciones de separación.

Descartada la higuera como materia prima, sobreviven entre de 160 y 192 combinaciones.

La principal enseñanza y conclusión de los ejercicios alrededor de alternativas con aceite de higuera, es la necesidad de integrar los tres frentes de análisis, por cuanto al dejar alguno de lado, se continúan ejercicios con alternativas no favorables sin detectarlo, como en la presente experiencia sin EE, lo que no permitió ver la no rentabilidad.

3.2.2. Herramienta aplicada a planta de biodiesel a partir de aceite de palma

Con el aceite de palma se sabe que hay plantas industriales en funcionamiento para la producción de biodiesel y extracción del aceite (relativamente numerosas), como se muestra en la tabla 4.

Ya con la información real, es obvio que se debe aplicar la metodología a la única tecnología de producir biodiesel aplicada realmente en Colombia. Es lo que se

presenta en el numeral 3.3.1, y que resulta ser el único que llega a la aplicación de la metodología en su totalidad, como ya se anunció en la introducción del presente capítulo.

Tabla 4. Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento (Colombia 2012).

Región	Empresa	Capacidad (t / año)
Norte, Codazzi	Oleoflores	70.000
Norte, Santa Marta	Odín Energy	36.000
Norte, Santa Marta	Biocombustibles Sostenibles del Caribe	100.000
Oriental, Facatativá	Bio D	100.000
Central, Barranca	Ecodiesel de Colombia	100.000
Oriental, San Carlos de Guarao, Meta	Aceites Manuelita	100.000

Fuente: <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-271.htm>

No obstante, con el propósito de evaluar y comparar otras alternativas, se emprendió la aplicación de la metodología al caso de catálisis heterogénea ácida con etanol. Esta se presenta en el numeral 3.3.2, y puesto que obtiene malos resultados en los aspectos técnicos, económicos y ambientales, solo se le aplicó la parte izquierda de la herramienta de análisis de la figura 3.

3.3. ANÁLISIS “PUERTA A PUERTA”

En este apartado se aplican los pasos metodológicos descritos en la parte izquierda de la figura 3, con el objeto de comparar alternativas tecnológicas para la etapa de producción de biodiesel.

El ASP para cada uno de los tres casos de estudio (numerales 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3) se realizó usando el software Aspen Hysys 2006.5®, con el objetivo de obtener los balances másicos y energéticos, así como las condiciones de presión, temperatura y composición de cada corriente, datos necesarios para las evaluaciones de las etapas siguientes. Todos los balances se realizaron tomando como base de

cálculo la construcción de una planta con una producción de 80.000 toneladas por año (ver apartado 2.3).

3.3.1. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: con metanol y NaOH (homogénea) como catalizador

El diseño del proceso fue realizado partiendo de aceite crudo de palma (ACP). Para adelantar la simulación se tuvieron en cuenta los seis triglicéridos presentes en mayor porcentaje en el ACP: PLO, PLP, OOO, POO, POP y PPP⁴², la composición de cada uno de ellos en el ACP se muestra en la tabla 5 (Gunstone 2002). Por otra parte se considera una acidez del 3% en peso de ácido palmítico (ácidos grasos libres, AGL) (Fangrui y Milford 1999).

Tabla 5. Composición en peso del aceite de palma.

% p/p	Compuesto
11,3	PLO
12,7	PLP
6,6	OOO
26,2	POO
33	POP
7,2	PPP
3	Acido palmítico

Fuente: Gunstone, 2002.

Los compuestos que no se encontraron en las librerías de Aspen Hysys® fueron creados usando la herramienta para crear hipotéticos, entre ellos se tienen los triglicéridos del ACP, para los que se utilizó el método de contribución de grupo propuesto por Constantinou y Gani (2004) para estimar sus propiedades críticas.

⁴²Triglicéridos formados por los ácidos grasos correspondientes a P = ácido palmítico, O = ácido oleico y L = ácido linoleico.

Los modelos termodinámicos empleados fueron: modelo de actividad NRTL para la fase líquida dada la naturaleza polar del metanol y la glicerina (Zhang *et al.* 2003), Peng-Robinson para las corrientes en fase vapor, la ecuación de estado BWRS para las corrientes con alto contenido de triglicéridos y el modelo semiempírico Chao Seader para las corrientes ricas en metilésteres (Rivero *et al.* 1999). El diseño de la planta en Aspen Hysys® se llevó a cabo siguiendo los pasos que se muestran en la figura 9.

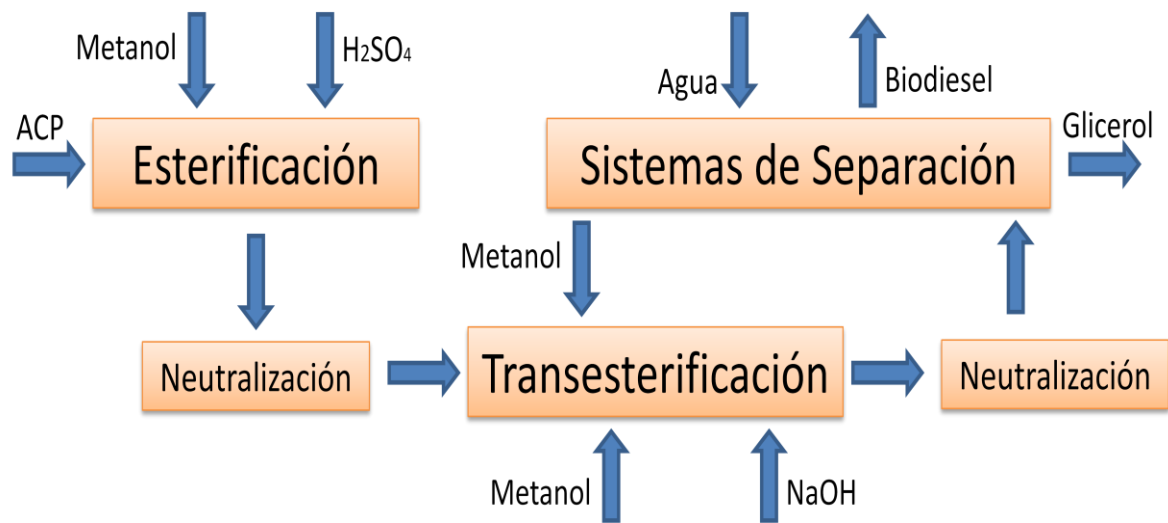


Figura 9. Diagrama de bloques: biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora.

La primera etapa del proceso consiste en la esterificación de los AGL presentes en el ACP. Esta esterificación se llevó a cabo en un reactor CSTR a 60 °C y 265 kPa, con una relación molar de metanol / ácido palmítico de 17:1, en presencia de ácido sulfúrico puro, obteniéndose una conversión de 97%. Se utilizó el modelo de primer orden en el que el factor de frecuencia y energía de activación de la ecuación de Arrhenius están dados por $A = 1,27 \text{ s}^{-1}$ y $E_a = 13.300 \text{ kJ / kmol}$, propuesto por Sendzikiene *et al.* 2004.

La etapa de transesterificación se desarrolló a 65 °C y 470 kPa en un reactor CSTR, en presencia de hidróxido de sodio puro, con una relación molar de metanol / aceite 9:1 para garantizar una conversión alta de los triglicéridos alrededor del 97,8% (Zapata *et al.* 2007). El modelo cinético empleado fue el reportado por Sit *et al.* 2004, el cual considera la reacción global como irreversible (ecuación 29).

$$-r = \frac{dC_{tg}}{dt} = kC_{tg} C_{msoh} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde, C_{tg} es la concentración de triglicéridos en gmol / litro, C_{msoh} es la concentración de metanol en gmol / litro y $-r$ es la velocidad de reacción en gmol / (litro segundo). El factor de frecuencia y la energía de activación de la ecuación de Arrhenius son: $A = 9,1534 \times 10^6$ litro / (gmol segundo) y $E_a = 60.701$ kJ / kmol.

El lavado del biodiesel se simuló mediante una columna de extracción líquido – líquido, utilizando agua como agente extractor a 20 °C y 120 kPa (Zapata *et al.* 2007), con una relación molar de agua / biodiesel sin lavar de 65:1, para que la calidad del biodiesel cumpla con la norma ASTM D6751.

La etapa de recuperación del metanol se consideró en una torre de destilación de 60 °C y 150 kPa, con una relación de reflujo molar de 2,3 (condiciones obtenidas usando los métodos cortos de torres “Short-Cut”), logrando una recuperación del 97,8% del metanol que entra a la torre.

La figura 10 muestra el diagrama de la simulación realizada y la tabla 6 la información de las corrientes principales del proceso. La entalpía y entropía de referencia se calculan para poder realizar en los pasos siguientes la evaluación exergética.

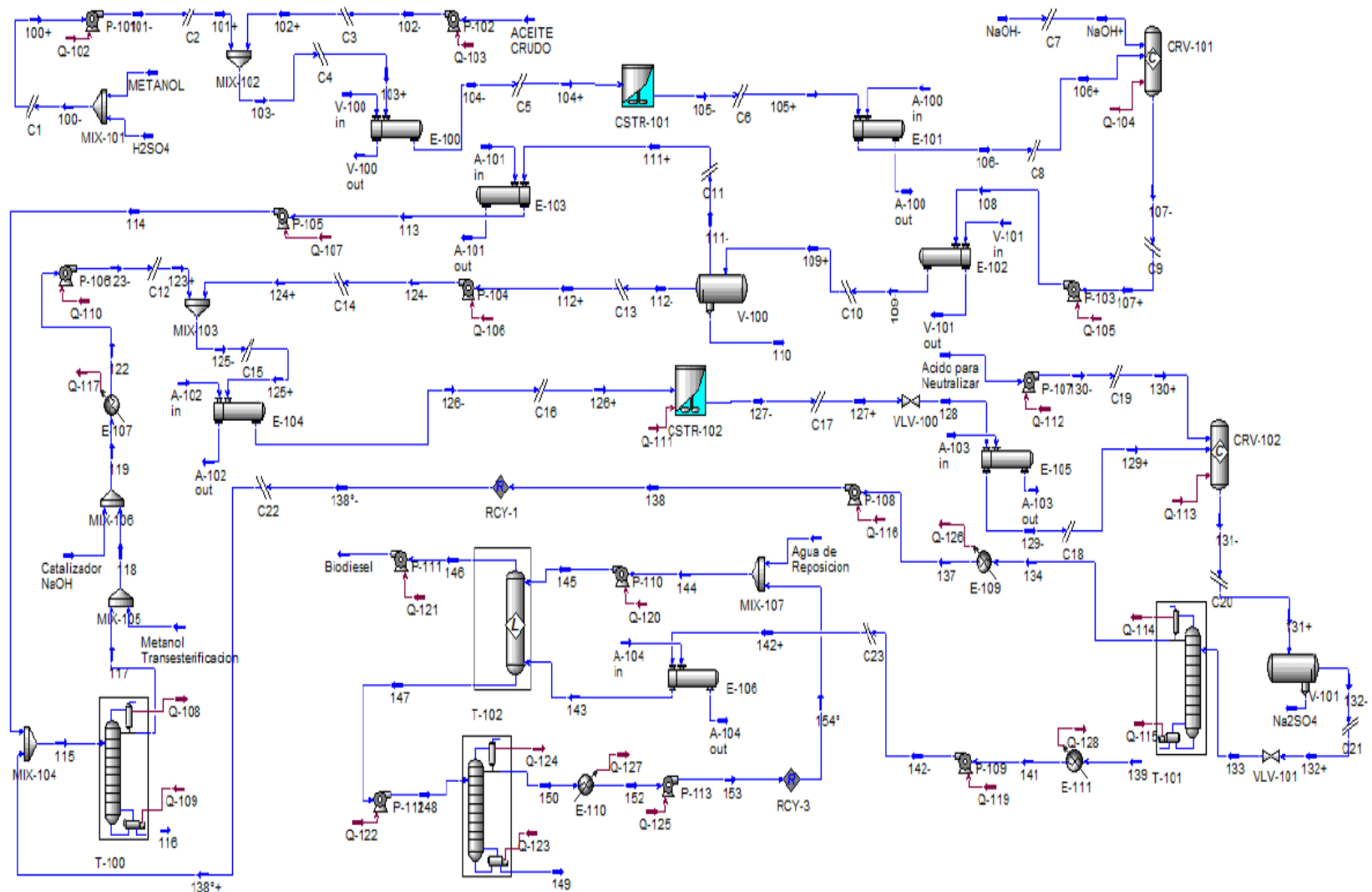


Figura 10. Simulación. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora.

Tabla 6. Información de las principales corrientes. Producción de biodiesel de aceite de palma con metano y NaOH como catalizador.

Corrientes Principales	Condiciones		Flujo (kmol/h)	T operación		T referencia (298.15 K)	
	P (atm)	T (°C)		Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)	Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)
ACP	1.00	25.0	11.9	-1862774	2024.2	-1862774	2024.2
Metanol fresco	1.00	25.0	35.3	-239433	46.7	-239433	46.7
Glicerol	0.30	171.9	13.6	-590016	143.6	-639726	6.0
Biodiesel	2.00	20.0	33.2	-756785	462.3	-754206	471.1

Fuente: La Autora.

Para la realización de la evaluación exergética se siguieron los pasos descritos en la sección (2.2.3.). El primer paso de la metodología descrita es dividir el sistema en volúmenes de control que para el caso de evaluación exergética de plantas industriales son los equipos, de tal forma que la frontera de cada volumen de control corresponde a la frontera física de cada equipo.

El sistema de referencia se definió a lo largo de todo el proceso usando los valores estándar de temperatura y presión, 25 °C y 1 atm respectivamente.

El análisis exergético que se reporta tiene las siguientes suposiciones y limitaciones:

- Solamente se incluyen los equipos principales del proceso, no se incluyen las tuberías, ni tampoco las etapas de producción de servicios industriales.
- Se considera que la planta opera en estado estacionario, dejando por fuera los problemas de carácter dinámico.
- Debido a que el grado de magnitud de los efectos de energía cinética y potencial es muy pequeño en comparación con los demás, se omiten los términos de exergía cinética y potencial.

- Se considera que todos los equipos de la planta operan adiabáticamente a excepción de los dos reactores de neutralización y el de esterificación.

Usando las expresiones que describen la primera ley, se obtienen los valores del trabajo realizado por las bombas, el calor suministrado (rehervidor) y liberado (condensador) en las torres de destilación, la transferencia de calor en los intercambiadores de calor y el calor necesario para mantener constante la temperatura en los reactores⁴³.

Usando el trabajo de las bombas se evaluó el flujo de exergía de las bombas. Estos dos valores son idénticos debido a que la energía puede ser aprovechada en su totalidad para realizar trabajo.

Partiendo de los flujos de calor de los equipos se calcularon las exergías que se detallan en la tabla 7, empleando el primer término de la ecuación (18).

El valor negativo de la exergía en Q-127 se debe a que la temperatura de la fuente (enfriador) está por debajo de la temperatura de referencia, en estos casos el ambiente es quien realiza “trabajo” sobre el sistema.

Por otra parte usando las expresiones para evaluar exergía física y química (ver apartado 2.2.3) se evaluó la exergía de cada una de las corrientes del proceso. La tabla 8 enseña los valores calculados para las corrientes principales.

La exergía física de las corrientes que se encuentran a las condiciones de referencia es cero, esto significa que estas corrientes no poseen trabajo útil disponible para el sistema de referencia. Utilizando las exergías de las corrientes se evaluaron las irreversibilidades y la eficiencia exergética para cada uno de los

⁴³Toda esta información también se requirió para el diseño básico de los equipos, el cual es necesario para estimar los precios de cada uno.

equipos. Los resultados se muestran en la tabla 9. En ella se puede apreciar que la mayor parte de la exergía (94%) se destruye en las torres de destilación, siendo T-103 el equipo que más irreversibilidades aporta. Este equipo es el encargado de separar el agua del lavado del biodiesel de la glicerina y opera a una presión por debajo de la atmosférica.

Tabla 7. Flujos de exergía de corrientes de potencia y calor. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

CORRIENTE	Flujo de energía (MJ/h)	Flujo de exergía (MJ/h)
Q-102	0,25	0,25
Q-103	3,14	3,14
Q-105	1,03	1,03
Q-106	6,48	6,48
Q-107	0,05	0,05
Q-110	2,88	2,88
Q-112	1,3E-03	1,3E-03
Q-116	0,21	0,21
Q-119	0,27	0,27
Q-120	1,3	1,3
Q-121	1,3	1,3
Q-122	5,9	5,9
Q-125	6,02	6,02
Q-104	295,8	4,88
Q-108	10.879,83	1.006,01
Q-109	10.867,92	1.820,67
Q-111	2.262,05	267,58
Q-113	26,52	0,44
Q-114	9.438,49	1.103,95
Q-115	16.128,78	7.530,96
Q-117	213,36	16,51
Q-123	367.870,37	95.977,78
Q-124	360.713,06	30.493,07
Q-126	211,32	22,2
Q-127	7.190,53	-122,64
Q-128	1.719,83	658,53

Fuente: La Autora.

Analizando las irreversibilidades por etapas del proceso (ver figura 11), se encontró que la separación y purificación de la glicerina (y al mismo tiempo recuperación del agua de lavado de biodiesel) es la etapa con más

irreversibilidades 65.030 MJ/h, nuevamente esto es causado por las condiciones de operación de T-103.

Tabla 8. Flujos de exergía de las principales corrientes. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Corriente	Exergía física (MJ/kmol)	Exergía Química (MJ/kmol)	Flujo de exergía (MJ/h)
Aceite crudo	0	31.431,12	373.042,22
Biodiesel	0,47	11.149,25	370.623
Metanol	0	702,99	13.022,87
Metanol transesterificación	0	702,99	11.823,95
Glicerina	8,68	1.851,58	25.212,68
Catalizador NaOH	0	77,43	28,08
NaOH	0	77,43	159,02
H ₂ SO ₄	0	139,75	133,57
Agua reposición	0	0,77	1,82

Fuente: La Autora.

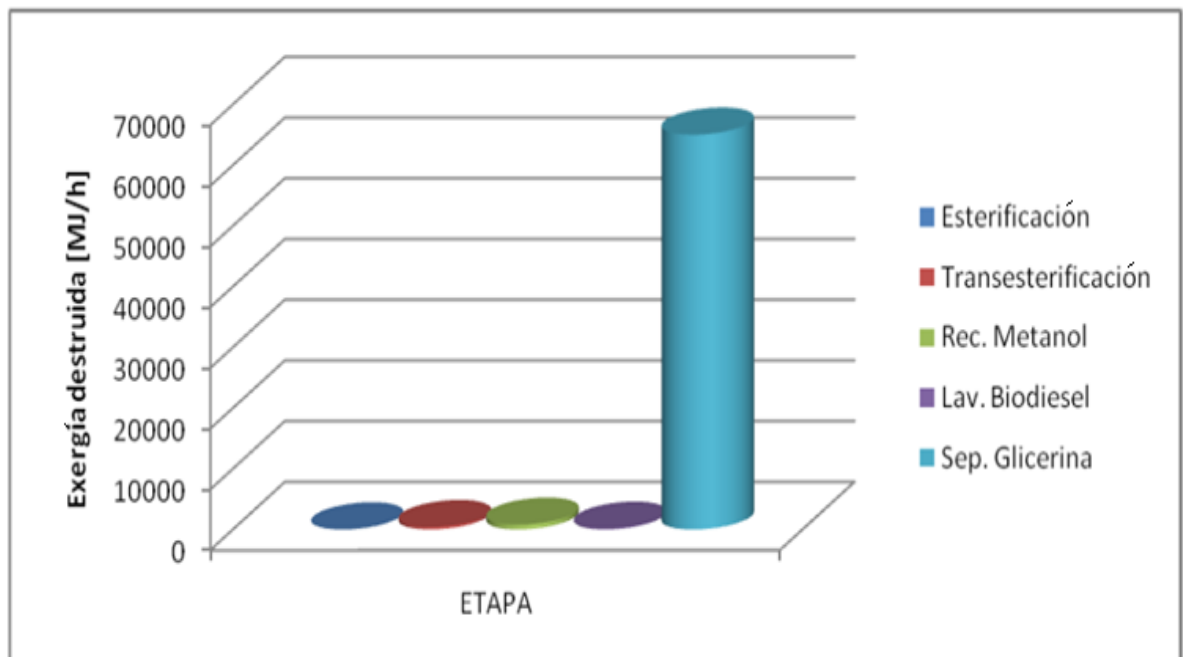


Figura 11. Distribución de las irreversibilidades por etapas del proceso. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora.

Tabla 9. Irreversibilidades y eficiencias en cada equipo de proceso. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

EQUIPO	Irreversibilidades (MJ/h)	Eficiencia exergética(%)	EQUIPO	Irreversibilidades (MJ/h)	Eficiencia exergética(%)
P-101	0,04	84,54	E-111	71,2	0
P-102	0,8	74,98	E-107	8,43	0
P-103	0,3	75,08	MIX-101	9,45	99,93
P-104	1,1	82,73	MIX-102	51,7	99,99
P-105	0,01	77,12	MIX-103	647,5	99,86
P-106	0,3	89,85	MIX-104	12	99,98
P-107	5E-04	58,7	MIX-106	0,84	100
P-108	0,02	89,75	MIX-107	0,06	100
P-109	0,04	84,57	MIX-105	3,21	100
P-110	0,32	74,79	VLV-100	38,1	99,99
P-111	0,56	57,11	VLV-101	0,97	100
P-112	1,48	74,89	CSTR-101	8,29	100
P-113	1,38	76,99	CSTR-102	395,9	99,91
E-100	292,9	63,41	CRV-101	211,8	99,95
E-101	260,2	3,84	CRV-102	62,7	99,99
E-102	909,8	33,86	V-100	14,7	96,99
E-103	65,6	39,05	V-101	8,76	100
E-104	170,7	23,68	T-102	125,4	89,68
E-105	53,7	38,84	T-100	786,2	94,42
E-106	828,1	22,78	T-101	4.240,40	87,01
E-109	2,96	0	T-103	65.030	18,2
E-110	304,9	0			

Fuente: La Autora.

El total de irreversibilidades del sistema calculado es 74.623 MJ/h y el 45% de este valor corresponde a calor difundido al entorno razón por la cual se propone realizar una integración energética al proceso para mejorar su eficiencia.

Para ilustrar la forma en que se distribuye la exergía de entrada al sistema a través del proceso se utilizan los diagramas de Grassman (el del caso de estudio 1 se enseña en la figura 12). Cuantificando el total de exergía que sale del sistema con los productos y la cantidad de exergía que ingresa se evaluó la eficiencia exergética del proceso con la ecuación 23. La eficiencia exergética del proceso es del 78%.

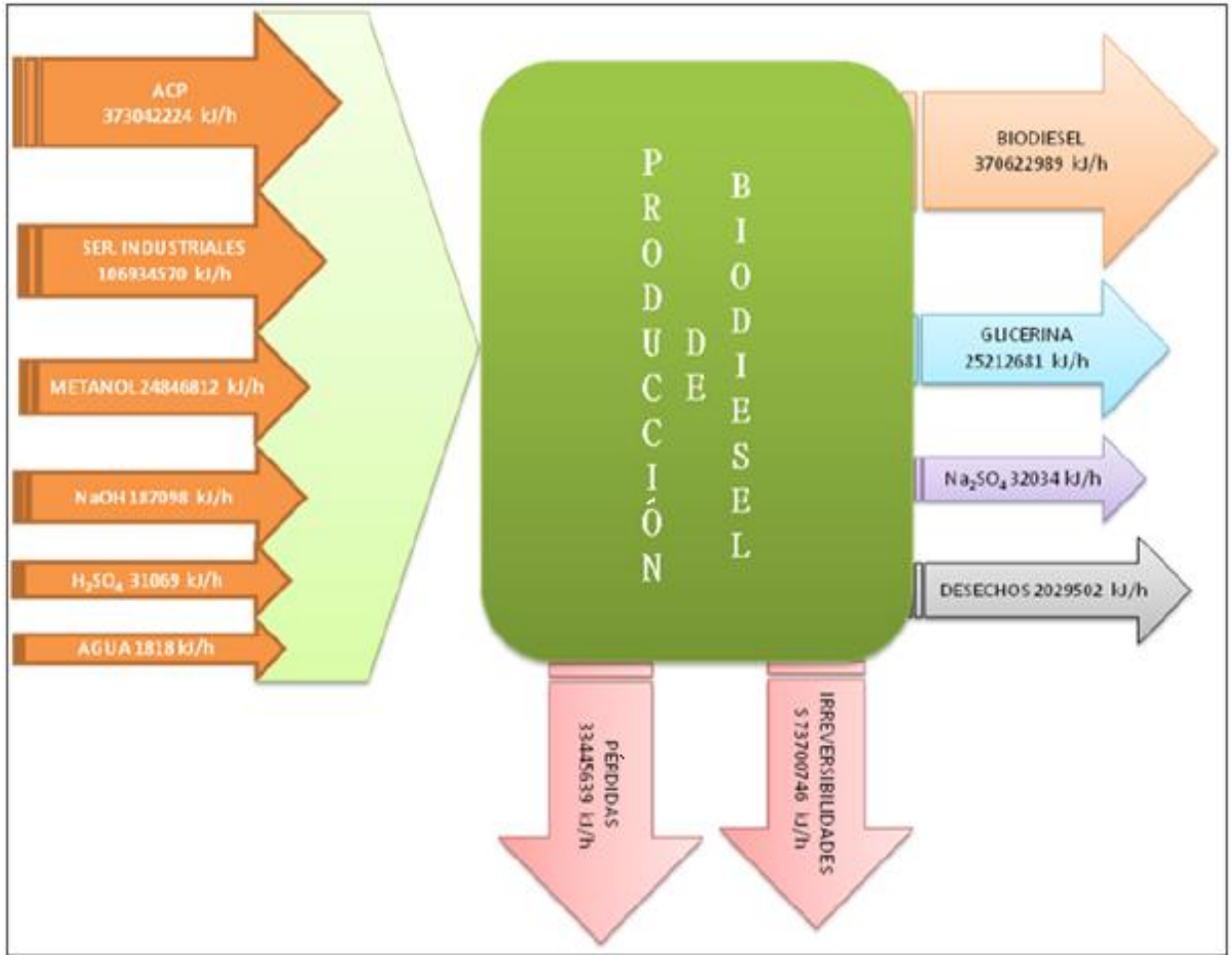


Figura 12. Diagrama de Grassman. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: Sierra y Casas 2011.

Para la evaluación económica se emplea la metodología que se describió en la sección 2.2.1. Se calculan primero la inversión y los costos, luego de los ingresos, ganancias, inversiones y se evalúa la TIR y el VPN en el último año. El tiempo de vida del proyecto se fija en quince años⁴⁴.

⁴⁴ Este es un valor promedio entre el que recomiendan la literatura clásica de evaluación de plantas químicas y el tiempo que se recomienda tomar cuando se analizan industrias que avanzan tecnológicamente a una velocidad superior al promedio.

Para realizar el cálculo de las inversiones empleando los factores de Lang es necesario evaluar primero el valor de compra del equipo fundamental. La tabla 10 contiene la listade los equipos del proceso y con sus precios llevados al año 2011 utilizando “Marshall and Swift Equipment Cost Index 2011”.

Tabla 10. Lista de precios de equipos. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.

EQUIPO	TIPO	PRECIO 2011 (COP\$)
P-101	Bomba Aceite crudo	26.220.968
P-102	Bomba metanol	20.632.893
P-103	Bomba después de neutralización	35.804.517
P-104	Bomba a transesterificación	29.015.006
P-105	Bomba metanol y otros	9.886.595
P-106	Bomba metanol y catalizador	20.417.967
P-107	Bomba solución ácida	13.325.410
P-108	Bomba reciclo metanol	16.979.152
P-109	Bomba biodiesel a purificación	33.528.451
P-110	Bomba para agua	14.400.040
P-111	Bomba salida de biodiesel	27.510.524
P-112	Bomba purificación de glicerina	13.540.336
P-113	Bomba reciclo agua	13.392.037
E-100	Intercambiador para calentar	139.701.881
E-101	Intercambiador para enfriar	103.594.318
E-102	Intercambiador para calentar	153.242.217
E-103	Intercambiador para enfriar	100.960.314
E-104	Intercambiador para enfriar	87.904.722
E-105	Intercambiador para enfriar	116.377.856
E-106	Intercambiador para enfriar	81.751.391
E-107	Intercambiador para enfriar	42.211.804
E-109	Intercambiador para enfriar	29.659.784
E-110	Intercambiador para enfriar	56.056.992
E-111	Intercambiador para enfriar	39.566.152
MIX-101	Mezclador metanol-ácido	1.934.334
MIX-102	Mezclador pre esterificación	2.604.903
MIX-103	Mezclador pre transesterificación	2.529.679
MIX-104	Mezclador reciclos metanol	2.284.663
MIX-105	Mezclador metanol	1.856.960
MIX-106	Mezclador metanol-catalizador	1.949.379
MIX-107	Mezclador agua	1.547.467
CSTR-101	Reactor de pretratamiento	379.129.411
CSTR-102	Reactor de transesterificación	632.419.667
V-100	Separador (esterificación)	66.627.051
V-101	Separador (purificación biodiesel)	77.588.275
T-102	Columna extracción I-I	287.752.561

T-100	Columna de destilación purif. Metanol	285.284.136
T-101	Columna de destilación rec. Metanol	802.103.721
P-103	Columna de destilación	268.272.745
VALOR DE COMPRA DEL EQUIPO FUNDAMENTAL		4.039.566.279

Fuente: La Autora.

Como datos de diseño que influyen en el tamaño y tipo de los equipos, y por tanto en su valor, se tiene que para las bombas se tuvo en cuenta una eficiencia del 75%. Se consideró que todas ellas son de tipo centrífugo puesto que las presiones que se manejan no superan los 304 kPa y para los caudales calculados, el costo y funcionamiento de este tipo de bombas es satisfactorio.

Para el calentamiento y enfriamiento de los fluidos se seleccionaron intercambiadores de calor de tubos y coraza, por ser los utilizados en estos tipos de procesos y porque se confirmó que los que podrían ser alternativa, los de doble tubo, no son recomendables porque las necesidades de área de transferencia, en la casi totalidad de los casos, superaba las máximas disponibles industrialmente: la metodología de diseño utilizada es la propuesta por Kern (1965).

Los factores de Lang basados en el valor de compra del equipo fundamental son: 3,6 para inversión directa, 1,44 para inversión indirecta y 0,89 para la inversión de trabajo. La tabla 11 contiene las inversiones calculadas.

Tabla 11. Valores de inversión. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como Catalizador. Planta de 80.000 t/año.

INVERSIÓN	VALOR 2011 (COP\$)
Directa	14.542.438.604
Indirecta	5.816.975.442
Trabajo	3.595.213.988
Fija	20.359.414.045
TOTAL	23.954.628.034

Fuente: La Autora.

Los precios de las materias primas y servicios industriales fueron tomados de fuentes actuales en algunos casos⁴⁵ y, en otros casos, se utilizaron los precios reportados por estudios anteriores⁴⁶ los cuales se actualizaron tomando como índices de precios una inflación del 4% anual; para los flujos másicos se toman los resultados del ASP. La tabla 12, resume la información y enseña el valor evaluado para los CUMP.

Tabla 12 . Evaluación de CUMP para producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.

MATERIAS PRIMAS	FLUJO ANUAL (kg / año)	PRECIO 2012 (COP\$/kg)	FLUJO ANUAL 2012 (COP\$/año)
ACP	84.124.908	1.900	159.837.325.200
Metanol	9.907.665	1.859	18.422.312.524
H ₂ SO ₄	1.031.017	205	211.339.590
NaOH	2.592.060	1.669	4.328.847.962
	CUMP (COP\$/año.kg de biodiesel)		2.285

Fuente: La Autora.

Los precios unitarios usados para estimar los costos de servicios industriales contenidos en la tabla 13 son: energía eléctrica 410,43 COP\$/kWh, vapor 24,23 COP\$/kg , agua 3 COP\$/kg, tratamiento efluente ácido del pretratamiento del ACP 406,2 COP\$/kg y tratamiento del agua con glicerina 100,85 COP\$/kg. De nuevo los flujos másicos y energéticos se toman del ASP.

Los costos de mano de obra se evaluaron tomando como base un estudio realizado para una planta que utiliza la misma tecnología pero que tiene una producción de 100.000 t/año de biodiesel. El número de salarios mínimos estimado por CORPODIB para esta planta es 156,6 que multiplicados por doce veces el salario mínimo mensual vigente y un factor prestacional 1,7, arroja unos costos de mano de obra iguales a COP\$1.810.402.488 en el año 2012. Luego

⁴⁵ Por ejemplo, para el ACP el reportado (junio de 2012) por FEDEPALMA.

⁴⁶ Por ejemplo el H₂SO₄ tomado de estudios hechos por CORPODIB.

empleando la ecuación (4) presentada en el capítulo 2, se calcula la mano de obra.

Tabla 13. Evaluación de CUSI para producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.

ENERGÍA ELÉCTRICA	FLUJO ANUAL (kWh / año)	FLUJO ANUAL 2012 (COP\$/año)
Obtención del éster	1,198E+04	4.916.326
Purificación del éster	5,923E+06	2.430.910.725
Purificación glicerina	2,140E+03	878.129
Recuperación metanol	6,186E+02	253.884
VAPOR	FLUJO ANUAL (kg / año)	FLUJO ANUAL 2012 (COP\$/año)
Obtención del éster	7,74000E+06	187.566.502
Purificación del éster	1,34023E+07	324.783.161
Purificación glicerina	2,06026E+07	499.270.838
Recuperación metanol	1,20302E+07	291.532.663
AGUA	4,76627E+09	12.838.766.110
Tratamiento efluente pretratamiento	2,628E+05	106.750.770
Tratamiento efluente transesterificación	1,58E+05	15.902.184
CUSI (COP\$ / año.kg de biodiesel)		209

Fuente: La Autora.

$$C_{MO_{O_2}} = COP\$1.810.402.488 \left(\frac{80.000 \frac{t}{año}}{100.000 \frac{t}{año}} \right)^{0,35} = COP\$1.693.176.117 \quad \text{Ecuación 30}$$

Los costos de mantenimiento se tomaron como 5% del valor de compra de los equipos, pero puesto que el equipo fundamental se cotizó en el año 2011 se hace una corrección de tiempo para el 2012 empleando la inflación como índice. El costo de mantenimiento es entonces COP\$201.978.314.

Por otra parte el factor de ajuste para los costos totales antes de impuestos (F_a en la ecuación 6 del capítulo 2) usado fue de 0,1.

Para evaluar los ingresos se tuvo en cuenta que el proceso tiene dos productos: biodiesel y glicerol. La tabla 14 contiene los flujos en masa y en dinero correspondientes a ellos, con precios actuales (junio 2012).

Tabla 14. Ingresos por venta de los productos. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.

PRODUCTO	FLUJO (kg / año)	Precio (COP\$/kg)	FLUJO 2012 (COP\$/año)
Biodiesel	8,000E+07	2.820	225.600.000.000
Glicerol	1,5023E+05	1.100	165.253.546
TOTAL		225.765.253.546	COP\$/ año

Fuente: La Autora.

Las tablas 15 y 16 presentan el flujo de fondos del proceso; para su elaboración se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tiempo de vida del proyecto: 15 años.
- Inflación del 4%. Tasa atractiva mínima (TAM) del 12%.
- Los precios de insumos y productos se corrigieron con la inflación.
- Depreciación lineal anual del 10% de la inversión fija hasta valor de salvamento del 50% de la inversión fija.
- Impuestos al patrimonio del 3% y a las utilidades del 35%.

En este escenario la recuperación de la inversión se da en 10 años, el valor presente neto año es COP\$5.167.697.312, el precio de equilibrio del biodiesel es de 2.810 COP\$/kg y el precio de equilibrio del aceite crudo de palma calculado bajo las mismas condiciones es 1.908 COP\$/kg. La tasa interna de retorno (TIR) para la planta hallada es 27,19%.

Las figuras 13 y 14, presentan cómo varía el precio de equilibrio cuando se cambia la TAM del proyecto. Los valores de TAM resaltados en gráfica fueron seleccionados para comparar el comportamiento de los precios de equilibrio con la posibilidad de poder pagar créditos bajo tres condiciones diferentes; los créditos con fomento tienen tasas efectivas anuales alrededor del 9%, la tasa más probable para proyectos de esta magnitud para agentes económicos con amplia trayectoria crediticia es del 12% (misma TAM utilizada para la evaluación de las tablas 15 y 16) y el 18% es el interés efectivo anual que se ofrece a agentes económicos con poca trayectoria crediticia. De todas maneras, dado un precio de mercado de 2.820 COP\$/Kg de producto, el proyecto es rentable con todas las situaciones financieras descritas.

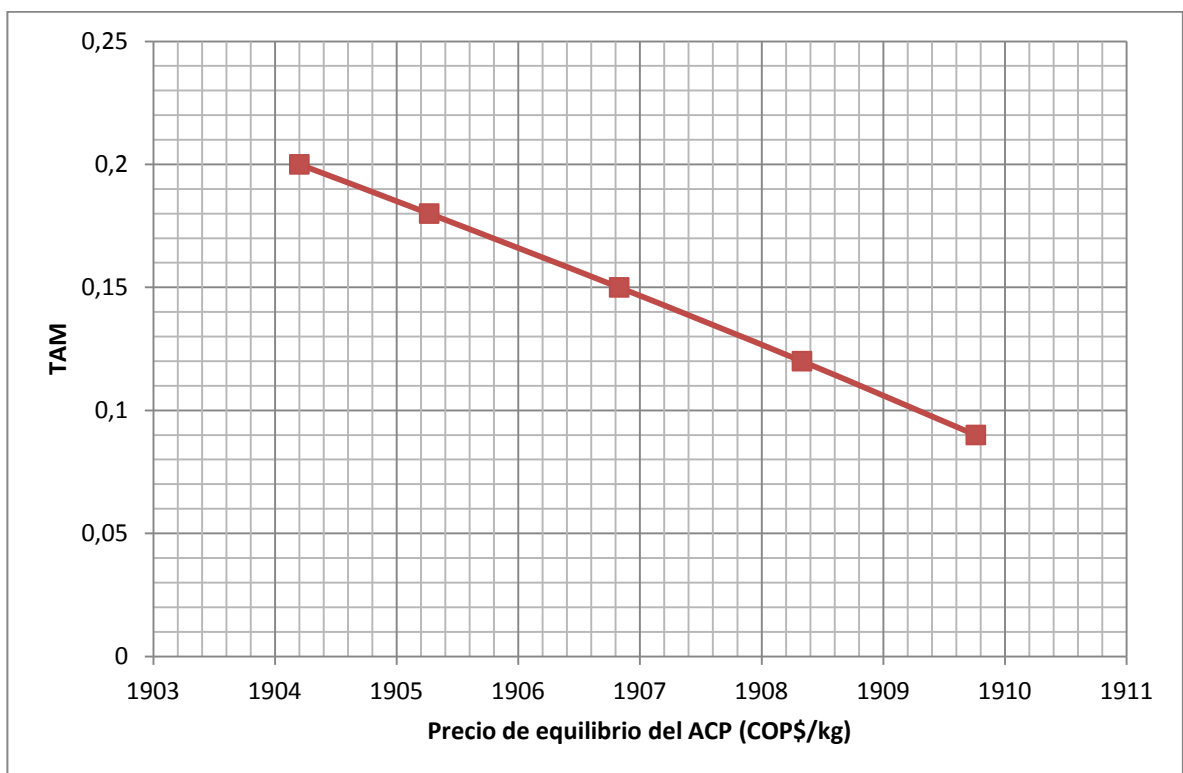


Figura 13. Comportamiento del precio de equilibrio del aceite crudo de palma con la TAM. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta de 80.000 t/año.

Fuente: La Autora

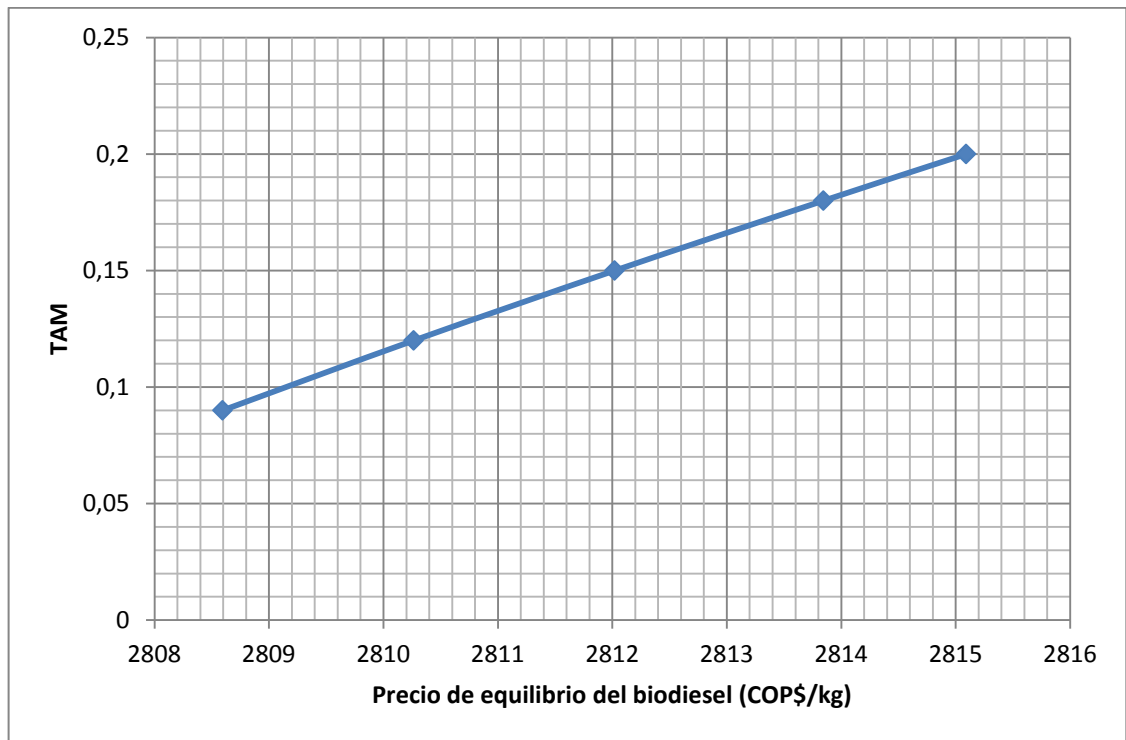


Figura 14. Comportamiento del precio de equilibrio del biodiesel con la TAM. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Planta de 80.000 t/año.

Fuente: La Autora.

La metodología ACV descrita en el numeral 1.3.1 y las ecuaciones descritas en el apartado 2.2.2 fueron las utilizadas para la evaluación ambiental. El ACV empleado es de tipo “puerta a puerta” y el sistema estudiado se representa en la figura 15. La función del sistema es producir 80.000 t/año y las emisiones fueron estimadas para un año. No se incluye la construcción de la planta y el mantenimiento de la misma. Las categorías de impacto estudiadas son: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y uso de energía no renovable.

Tabla 15. Matriz de evaluación económica. Producción de biodiesel de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador.

Año	INGRESOS (COP\$ año)	C Mat. Primas ⁴⁷ (COP\$ año)	C Serv. Ind. ⁴⁸ (COP\$ año)	C Mano Obra ⁴⁹ (COP\$ año)	C Mant. ⁵⁰ (COP\$ año)	TOTAL COSTOS (COP\$ año)	U.R.A.I ⁵¹ (COP\$ año)
2012	225.765.253.546	182.799.825.276	16.701.531.291	1.693.176.117	210.057.447	223.782.877.922	1.982.375.624
2013	234.795.863.687	190.111.818.287	17.369.592.542	1.760.903.162	218.459.744	232.734.193.039	2.061.670.649
2014	244.187.698.235	197.716.291.018	18.064.376.244	1.831.339.288	227.198.134	242.043.560.760	2.144.137.475
2015	253.955.206.164	205.624.942.659	18.786.951.294	1.904.592.859	236.286.060	251.725.303.191	2.229.902.974
2016	264.113.414.411	213.849.940.365	19.538.429.346	1.980.776.574	245.737.502	261.794.315.318	2.319.099.093
2017	274.677.950.987	222.403.937.980	20.319.966.519	2.060.007.637	255.567.002	272.266.087.931	2.411.863.056
2018	285.665.069.027	231.300.095.499	21.132.765.180	2.142.407.942	265.789.682	283.156.731.448	2.508.337.578
2019	297.091.671.788	240.552.099.319	21.978.075.787	2.228.104.260	276.421.269	294.483.000.706	2.608.671.082
2020	308.975.338.659	250.174.183.292	22.857.198.819	2.317.228.430	287.478.120	306.262.320.735	2.713.017.925
2021	321.334.352.206	260.181.150.623	23.771.486.772	2.409.917.568	298.977.245	318.512.813.564	2.821.538.642
2022	334.187.726.294	270.588.396.648	24.722.346.242	2.506.314.270	310.936.335	331.253.326.106	2.934.400.188
2023	347.555.235.346	281.411.932.514	25.711.240.092	2.606.566.841	323.373.788	344.503.459.151	3.051.776.195
2024	361.457.444.760	292.668.409.815	26.739.689.696	2.710.829.515	336.308.740	358.283.597.517	3.173.847.243
2025	375.915.742.550	304.375.146.207	27.809.277.284	2.819.262.695	349.761.089	372.614.941.417	3.300.801.133
2026	390.952.372.252	316.550.152.056	28.921.648.375	2.932.033.203	363.751.533	387.519.539.074	3.432.833.178

Fuente: La Autora.

⁴⁷ Costos de materias primas en pesos colombianos del año corriente.

⁴⁸ Costos de servicios industriales en pesos colombianos del año corriente.

⁴⁹ Costos de mano de obra en pesos colombianos del año corriente.

⁵⁰ Costos de mantenimiento en pesos colombianos del año corriente.

⁵¹ Utilidades reales antes de impuestos en pesos colombianos del año corriente.

Tabla 16. Continuación evaluación económica.

Año	Depreciación acum. ⁵² (COP\$ año)	V.L. patrimonio ⁵³ (COP\$ año)	U.L.A.I. ⁵⁴ (COP\$ año)	Total imp. ⁵⁵ (COP\$ año)	U.R.D.I. ⁵⁶ (COP\$ año)	V.P.V. sto. ⁵⁷ (COP\$ año 2011)	V.P.N. ⁵⁸ (COP\$ año 2011)
2012	2.035.941.405	18.323.472.641	-53.565.781	549.704.179	1.432.671.444	10.586.895.304	-12.088.561.797
2013	4.071.882.809	16.287.531.236	25.729.244	497.631.173	1.564.039.476	11.010.371.116	-10.418.243.291
2014	6.107.824.214	14.251.589.832	108.196.070	465.416.319	1.678.721.155	11.450.785.960	-8.782.947.886
2015	8.143.765.618	12.215.648.427	193.961.569	434.356.002	1.795.546.972	11.908.817.399	-7.183.813.887
2016	10.179.707.023	10.179.707.023	283.157.688	404.496.401	1.914.602.691	12.385.170.095	-5.621.064.206
2017	10.179.707.023	10.179.707.023	2.411.863.056	1.149.543.280	1.262.319.776	12.880.576.899	-4.486.126.919
2018	10.179.707.023	10.179.707.023	2.508.337.578	1.183.309.363	1.325.028.215	13.395.799.975	-3.371.528.369
2019	10.179.707.023	10.179.707.023	2.608.671.082	1.218.426.089	1.390.244.992	13.931.631.974	-2.274.199.735
2020	10.179.707.023	10.179.707.023	2.713.017.925	1.254.947.484	1.458.070.440	14.488.897.252	-1.191.139.638
2021	10.179.707.023	10.179.707.023	2.821.538.642	1.292.929.735	1.528.608.907	15.068.453.143	-119.412.591
2022	10.179.707.023	10.179.707.023	2.934.400.188	1.332.431.276	1.601.968.911	15.671.191.268	943.853.316
2023	10.179.707.023	10.179.707.023	3.051.776.195	1.373.512.879	1.678.263.316	16.298.038.919	2.001.469.359
2024	10.179.707.023	10.179.707.023	3.173.847.243	1.416.237.746	1.757.609.497	16.949.960.476	3.056.189.649
2025	10.179.707.023	10.179.707.023	3.300.801.133	1.460.671.607	1.840.129.525	17.627.958.895	4.110.715.027
2026	10.179.707.023	10.179.707.023	3.432.833.178	1.506.882.823	1.925.950.355	18.333.077.251	5.167.697.312

Fuente: La Autora.

⁵² Depreciación acumulada en pesos colombianos del año corriente.

⁵³ Valor en libros del patrimonio en pesos colombianos del año corriente.

⁵⁴ Utilidades legales antes de impuestos en pesos colombianos del año corriente.

⁵⁵ Impuestos totales en pesos colombianos del año corriente.

⁵⁶ Utilidades reales después de impuestos en pesos colombianos del año corriente.

⁵⁷ Valor presente del valor de salvamento.

⁵⁸ Valor presente neto.

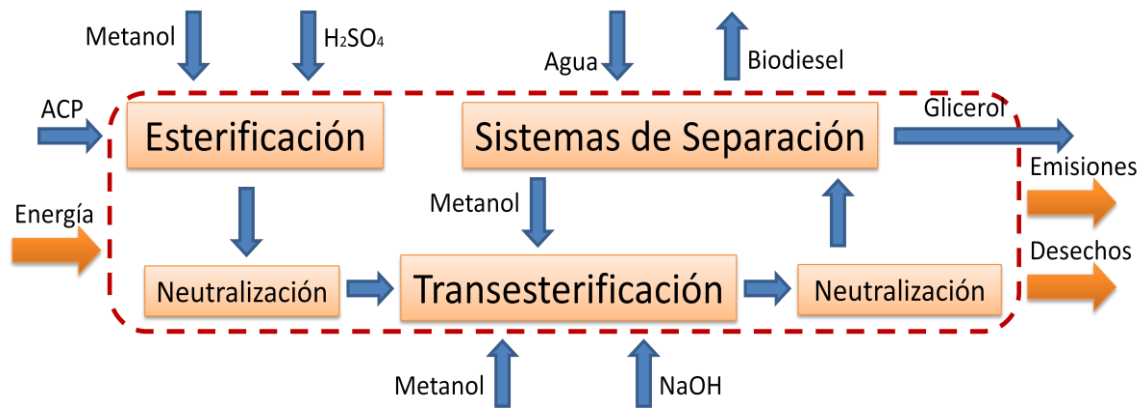


Figura 15. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador NaOH.

Fuente: La Autora.

Los balances máxicos y energéticos obtenidos con la simulación constituyen el análisis de inventario. Usándolos junto con los factores de caracterización del anexo C, se realizó la evaluación de impacto que se consigna en la tabla 17.

Al comparar el impacto evaluado en las categorías de cambio climático y uso de energía no renovable⁵⁹ con los datos reportados en Kian Fei *et al.* 2009 (259,72 kg-eq. CO₂/t biodiesel y 1.460,09 MJ/t biodiesel), se encontró que tanto la cantidad de CO₂ emitido como el uso de energía no renovable es inferior. Los datos de la referencia mencionada provienen de una planta real con capacidad de 100.000 t/año que tiene la misma ruta de transesterificación y que se localiza en Malasia. Las diferencias en los resultados son entonces adjudicados a que los datos reportados en la tabla 17 provienen de una simulación, que la capacidad de la planta es diferente y que dentro del proceso simulado se realizaron unas primeras aproximaciones para integrar energéticamente las etapas del proceso, logrando de esta manera proponer una tecnología que disminuye el uso de energía no renovable.

⁵⁹ Se recuerda que los datos de la tabla 17 son para producir 80.000 toneladas de biodiesel al año.

Tabla 17. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Planta 80.000 t/año.

Cambio climático (kg-eq. CO ₂)	CO ₂	1,47E+07
	CH ₄	3,68E+05
	N ₂ O	3,32E+04
	CO	1,57E+04
	Total	1,51E+07
Acidificación (kg-eq. H ⁺)	SO ₂	6,88E+03
	NO ₂	9,12E+02
	HCl	2,70E+01
	HF	5,88E+00
	NH ₃	3,65E-04
Total	7,83E+03	
Eutrofización (kg-eq. PO ₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,38E-01
	Nitrógeno (N ₂)	0,00E+00
	Amonia (como N)	1,72E+01
	Amoníaco (NH ₃)	2,17E-03
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,39E+03
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	3,78E+01
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	5,74E+01
Total	5,50E+03	
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	3,49E-02
	Formaldehidos	2,64E+00
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,77E+02
	Hidrocarburos	3,81E+02
	Metano (CH ₄)	0,00E+00
Total	9,61E+02	
Efectos respiratorios (kg-eq. PM _{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	1,04E+01
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,72E+04
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,28E+03
	Amonio (NH ₄)	4,96E+00
	Partículas (sin especificar)	3,98E+03
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	4,16E+01
	PM10	8,67E+02
Total	2,74E+04	
Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	6,32E+07
	Gas Natural	8,70E+01
	Total	6,32E+07

Fuente: La Autora.

3.3.2. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: con etanol y sulfato de zirconio como catalizador heterogéneo

El proceso consta de hidrólisis, esterificación y, concluye con etapas de separación para la recirculación de reactivos y purificación de los productos, como se muestra en la figura 16. Esta planta fue diseñada para producir 80.000 t/año de biodiesel. Las tres etapas fueron modeladas usando el paquete de fluidos UNIQUAC, que es el recomendado para representar el comportamiento de los compuestos involucrados (Santander, 2007).

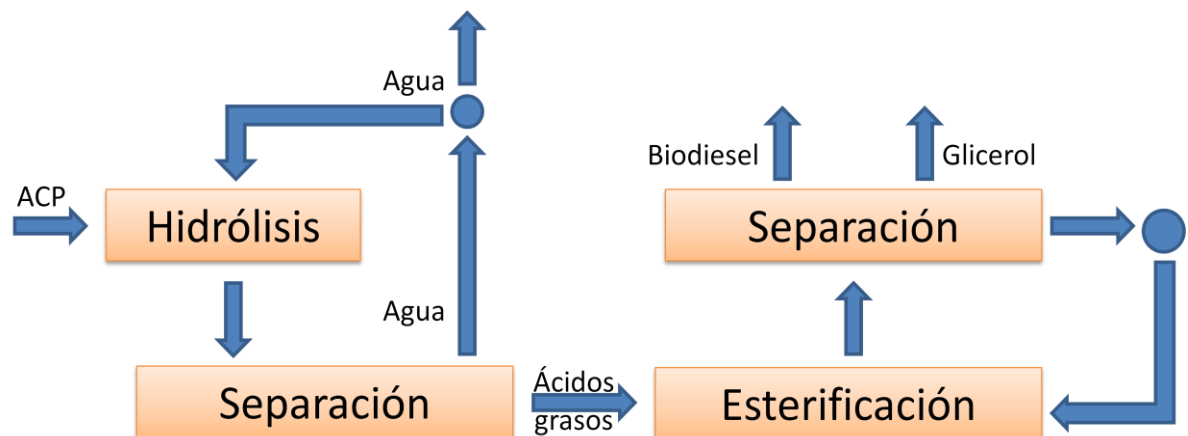


Figura 16. Diagrama de bloques del proceso. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.

Fuente: La Autora.

La fase de hidrólisis de los triglicéridos se manejó a 290 °C y 20 MPa, con una relación molar de agua / aceite igual a 60. Bajo estas condiciones la conversión es del 74% en menos de una hora (Saka y Minami, 2006). Por su parte, la esterificación ácida heterogénea se llevó a cabo a 120 °C y 0,45 MPa, usando una relación molar etanol/aceite igual a 100 (López *et al.*, 2008). El catalizador utilizado es el sulfato de zirconio y se aplicó el modelo Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (ecuación 31) para predecir el comportamiento del subsistema (Kubar y

Rajesh 2008, Suwannakarn *et al.* 2008, Mekhemer 2006, Costa *et al.* 2008, Busto *et al.* 2008).

$$-r_A = \frac{\text{factor cinético} \cdot \text{factor motriz}}{\text{término de adsorción}^n} \quad \text{Ecuación 31}$$

Cuando se tiene una reacción heterogénea de tipo: $A + B \rightarrow R + S$, la expresión toma la siguiente forma:

$$-r_A = \frac{k_1 + k_2 * X_A + k_3 * X_A^2}{k_4 + k_5 * X_A + k_6 * X_A^2} \quad \text{Ecuación 32}$$

Luego de la etapa de esterificación el biodiesel es purificado para llevarlo a condiciones comerciales (los requeridos por la norma ASTM D6751). La recuperación del etanol se simuló usando una destilación azeotrópica, empleando glicerina como solvente a 1 atm y 78,2 °C, con relación molar 0,4 glicerina /etanol. La columna de purificación de la glicerina se modeló a 130,2 °C y 15 mmHg.

En la tabla 18 se resumen las condiciones de las corrientes más relevantes del sistema y la figura 17 muestra el diagrama de flujo de la simulación realizada.

Tabla 18. Características de las corrientes principales. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.

Corrientes principales	Condiciones		Flujo (kmol/h)	T operación		T referencia (298.15 K)	
	P (atm)	T (°C)		Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)	Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)
ACP	1.00	25.0	10.4	-2007015	1983	-2007015	1983
Etanol fresco	1.00	25.0	32.3	-278278	13.57	-278278	13.57
Glicerol	1.00	171.9	10.5	-665659	52.90	-679337	-35.56
Biodiesel	2.00	20.0	31.6	-755101	555.9	-755101	555.9

Fuente: La Autora.

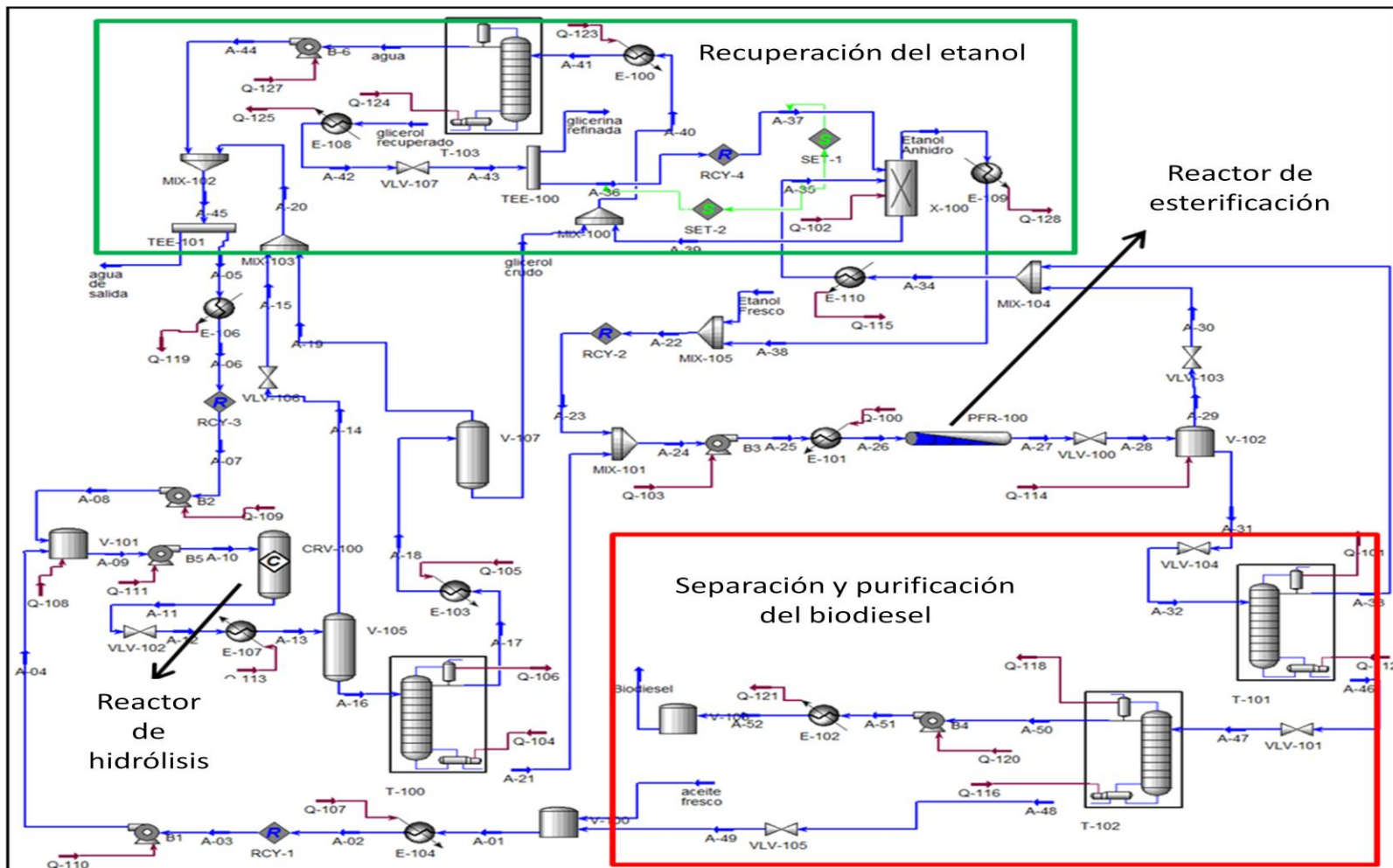


Figura 17. Diagrama de la simulación del Proceso. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.

Fuente: La Autora.

Al aplicar la metodología de evaluación exergética ya descrita, también en este caso se encuentra que la mayor parte de la exergía que se pierde es debido a los procesos de transferencia de calor. El total de irreversibilidades calculado fue de 106.739 MJ / h. La eficiencia exergética es de 53,47 %.

En cuanto a la evaluación económica se encontró que esta alternativa de proceso también es altamente sensible al precio del biodiesel y del aceite. Un precio de equilibrio mucho mayor que el precio de mercado del producto (\$COP4.849 Vs \$COP2.820), un costo de materia prima de equilibrio muy superior al que tiene el aceite de palma en el mercado, una TIR muy baja, un TRI mayor a la vida útil de la planta y un VPN negativo, son todos resultados que significan lo mismo: el proyecto está lejos de ser rentable. Definitivamente la Inversión de COP\$322.009.304.273 no se puede pagar.

Se utilizó la metodología ACV “puerta a puerta” para el análisis ambiental. No se incluyen las etapas de construcción de la planta y el mantenimiento de la misma. Las categorías de impacto estudiadas son las mismas del caso anterior. El sistema estudiado se representa en la figura 18 y la tabla 19 contiene los resultados de la evaluación de impacto ambiental.

Comparando los datos de la evaluación de impacto ambiental (tabla 19) con los obtenidos para la ruta de obtención del caso de estudio presentado en el apartado anterior (tabla 17), es evidente que el desempeño de esta ruta es bastante inferior. La cantidad de kg-eq. CO₂ y el uso de energía no renovable es de un orden de magnitud mayor. Ahora bien, haciendo uso de los resultados de la evaluación exergética, se concluye que esta alternativa tiene altas emisiones y uso de energía, así como pérdidas exergéticas debidas a los procesos de transferencia de calor requeridos para recircular el alto volumen de alcohol que es requerido en exceso en la etapa de esterificación.

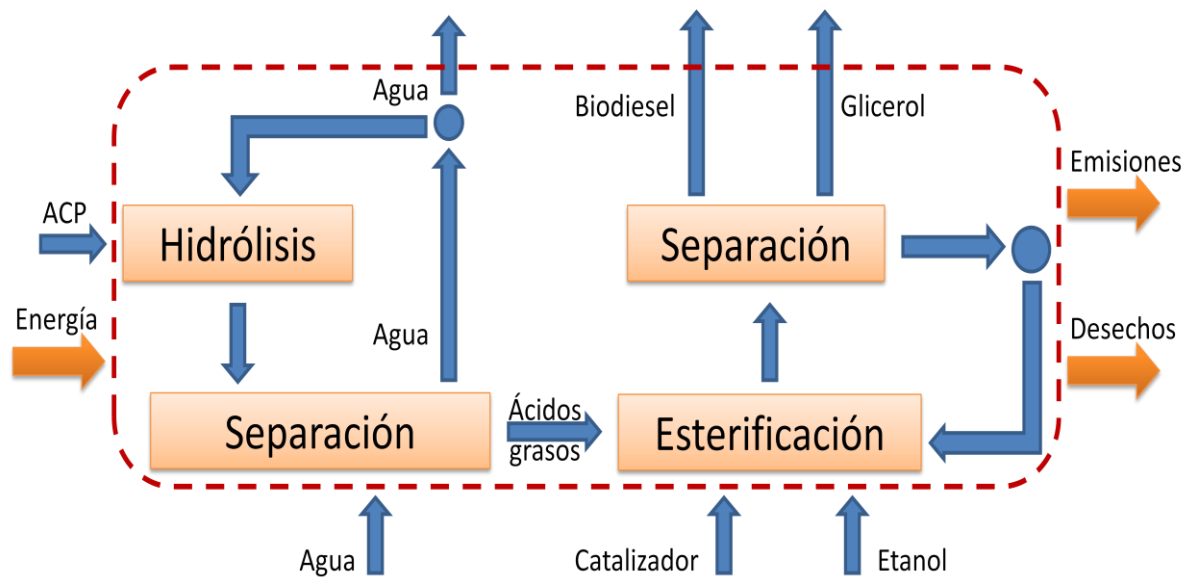


Figura 18. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta. Biodiesel a partir de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.

Fuente: La Autora.

3.3.3. Producción de biodiesel a partir de aceite de higuera: con metanol y NaOH como catalizador

En este tercer caso, el biodiesel es obtenido partiendo de aceite de higuera refinado (AHR) y metanol, haciendo su transformación mediante transesterificación básica con hidróxido de sodio como catalizador (Plentz *et al.* 2006; Meher *et al.* 2006; Demirbas 2005; Ma y Hanna 1999).

Los datos de entrada necesarios para la realización de la simulación fueron resultado del análisis de una serie de estudios entre los que se destacan: Knothe *et al.* 2005; CORPODIB, 2003; Haas *et al.* 2005; Sheehan *et al.* 1998 y Zapata *et al.* 2006.

Tabla 19. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	CO ₂	2,605E+08
	CH ₄	4,355E+06
	N ₂ O	6,740E+05
	CO	9,698E+04
	Total	2,657E+08
Acidificación (kg-eq. H+)	SO ₂	5,183E+04
	NO ₂	1,641E+04
	HCl	1,069E+03
	HF	2,438E+02
	NH ₃	1,569E-02
	Total	6,957E+04
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	5,885E+00
	Nitrógeno (N ₂)	0,000E+00
	Amonia (como N)	9,685E+01
	Amoníaco (NH ₃)	9,308E-02
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	9,697E+04
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	1,742E+02
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	1,167E+03
	Total	9,842E+04
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	2,135E-05
	Formaldehidos	1,765E-03
	Hidrocarburos (sin especificar)	1,148E+03
	Hidrocarburos	4,355E+02
	Metano (CH ₄)	0,000E+00
	Total	1,583E+03
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	6,450E+01
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,294E+05
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	9,495E+04
	Amonio (NH ₄)	2,800E+01
	Partículas (sin especificar)	1,599E+05
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	8,457E+02
	PM10	4,612E+02
	Total	3,857E+05
Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	3,862E+04
	Gas Natural	8,100E+08
	Total	8,092E+08

Fuente: La Autora.

Con el fin de tener una mejor comprensión de los fenómenos y una mayor precisión en la cuantificación másica y energética, el proceso fue dividido en dos etapas: obtención del éster y purificación del éster, glicerina y recuperación del metanol (ver figura 19). Los requerimientos de materias primas fueron calculados con una base de cálculo de 80.000 t/año de biodiesel. Se utilizó el paquete termodinámico NRTL por ser el más adecuado teniendo en cuenta la naturaleza de las sustancias en estudio, y los componentes no encontrados en la librería del programa fueron creados usando Hypomanager.

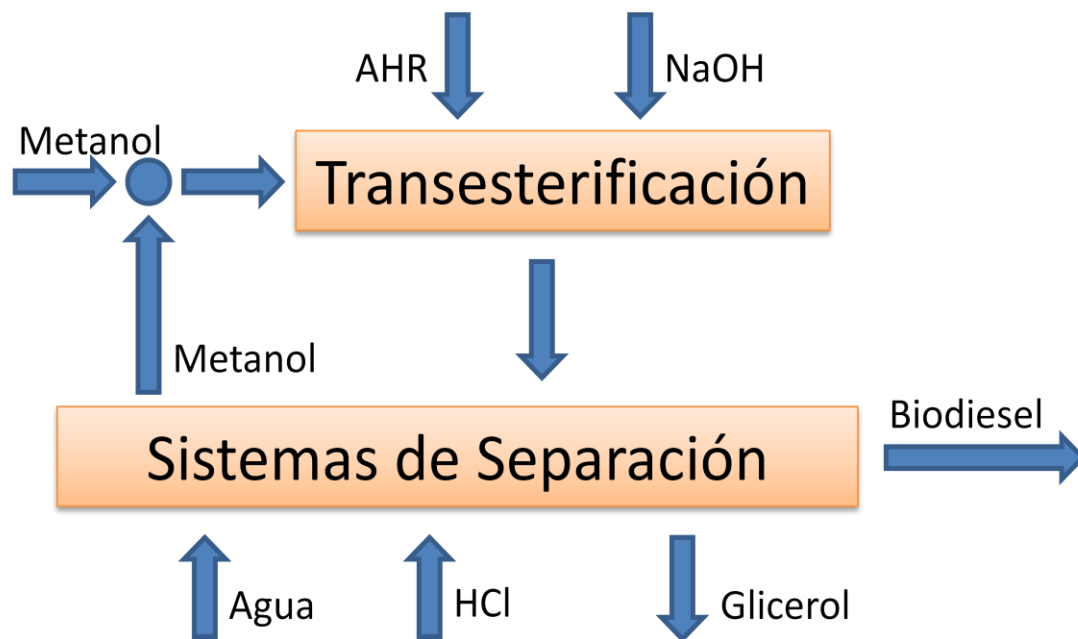


Figura 19. Esquema del proceso. Biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora.

La reacción de transesterificación se lleva a cabo a 60 °C usando una relación molar de aceite de higuera refinado – metanol 1:6, en presencia de metóxido de sodio como catalizador (0,35% pero de aceite). El sistema de reacción presenta un rendimiento del 99% y está conformado por dos reactores, cada uno de ellos con

una conversión del 90% y tiempo de residencia 1 hora. En el primer reactor se agrega el 90% de la mezcla alcohol – catalizador realizada previamente y el aceite proveniente del tanque de almacenamiento; la corriente de salida es llevada a un sistema de separación (decantadores) para separar la fase ligera (biodiesel + aceite que reaccionó), y la fase pesada (glicerina y otros). La fase ligera es llevada al segundo reactor donde es añadido el catalizador y el metanol restante, con el fin de que el aceite de ricino refinado que no logró convertirse en la primera reacción, lo haga en este reactor. El flujo de salida del reactor es introducido a un sistema de separación que permite obtener una corriente rica en biodiesel y otra compuesta por los productos colaterales de la reacción.

La corriente rica en biodiesel se lava con agua a 70° C en un sistema contracorriente para retirar las sales presentes y las impurezas solubles aprovechando la diferencia de densidad existente. Luego, el biodiesel es conducido a un par de evaporadores instantáneos para reducir el contenido del agua al 0,05%. El vapor de agua obtenido por el tope de los evaporadores es comprimido y posteriormente enviado al sistema de tratamiento. Los fondos de los sistemas de separación ubicados después de cada reactor y los fondos provenientes del lavado, son mezclados con una corriente de HCl (10%) con el fin de convertir los componentes jabonosos en ácidos grasos libres, los cuales son sometidos a una separación y retirados como co-producto del proceso.

La recuperación del metanol se realiza mediante destilación, mientras que la glicerina y el agua provenientes del evaporador son calentados antes de ingresar a un sistema de separación donde se obtiene finalmente una corriente 80% glicerina y una corriente de tope de agua, que es enfriada posteriormente y considerada como vertimiento. La tabla 20 presenta las condiciones de las corrientes más representativas del proceso y la figura 21 enseña el diagrama de la simulación.

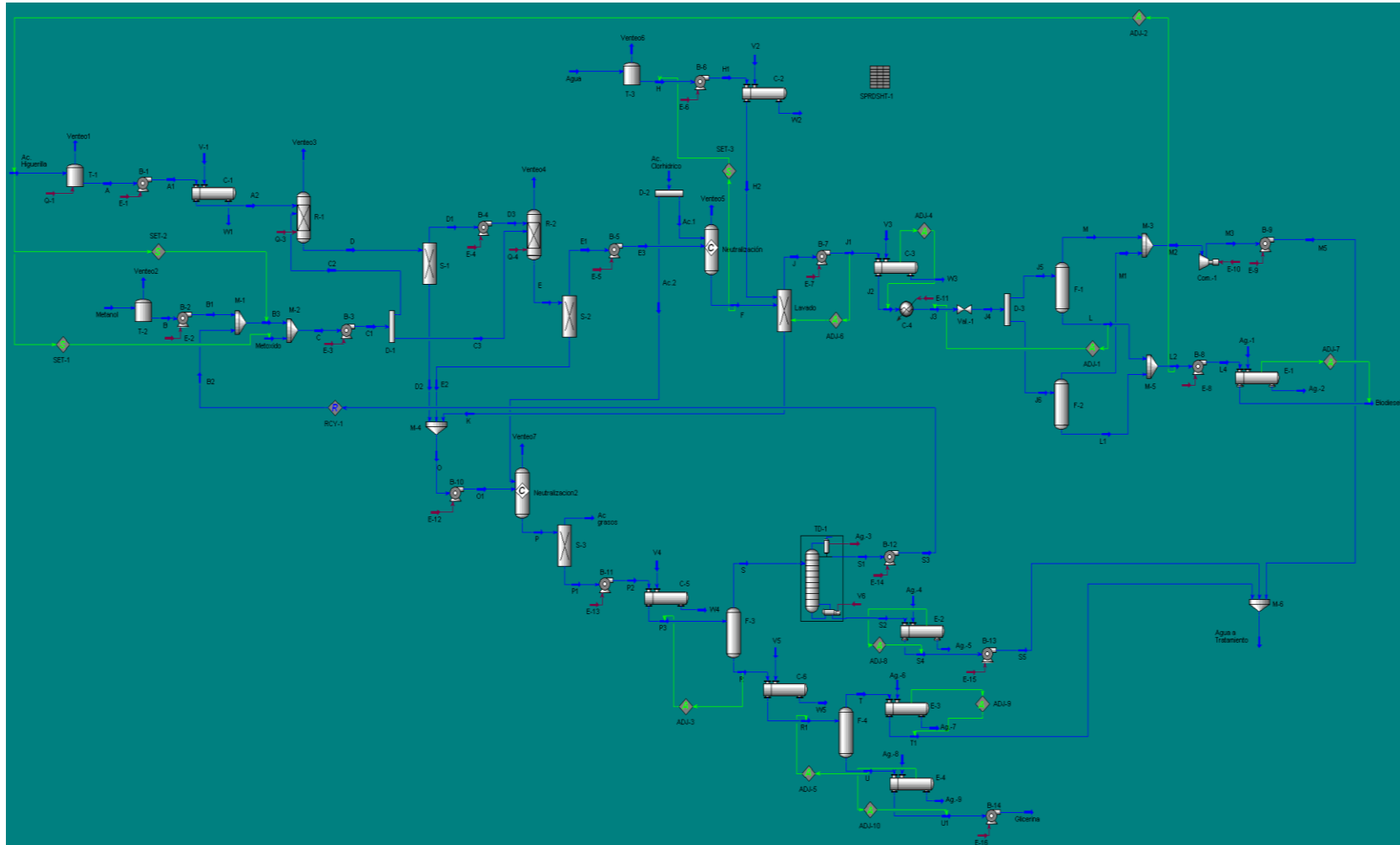


Figura 20. Simulación biodiesel de aceite de higuierilla con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora.

Tabla 20. Características de las corrientes principales. Biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.

Corrientes principales	Condiciones		Flujo(kmol/h)	T operación		T referencia (298.15 K)	
	P (atm)	T (°C)		Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)	Entalpía (kJ/kmol)	Entropía (kJ/kmol·K)
AHR	1,00	25,0	12,66	-2.261.899	1.744,67	-2.261.899	1.744,67
Metanol fresco	1,00	25,0	35,1	-239.433	46,7	-239.433	46,71
Glicerol	2,2	77,89	13,2	-738.112	56,8	-702.998	-41,12
Biodiesel	1,6	38,7	32,1	-778.382	590,3	-792.773	590,1

Fuente: La Autora.

Con la metodología de evaluación exergética ya presentada se encontró que la mayor parte de la exergía que se pierde es debido a los procesos de transferencia de calor. El total de irreversibilidades calculado fue de 371.293 MJ /hora. La eficiencia exergética evaluada con la ecuación 23 es de 81,12%.

Aplicando la metodología de evaluación económica, ver tablas de datos en anexo A2, se concluye sin lugar a dudas que el proyecto no es rentable. La inversión es de COP\$28.196.110.644. El precio de equilibrio del biodiesel es de COP\$4.071 (de lejos mayor que el de mercado), el costo de equilibrio del aceite de higuera es de COP\$2.142 (menor y lejos al del mercado, 3.240 COP\$/kg) y por tanto los demás indicadores en consecuencia.

Usando los balances másicos y energéticos obtenidos con la simulación, y teniendo en cuenta las mismas consideraciones que en los ACV de los dos casos de palma presentados, se realizó la evaluación de impacto al sistema representado en la figura 21. Los resultados se encuentran en la tabla 21.

Como era de esperarse el desempeño ambiental en este caso es muy similar al de la ruta que usa ACP con metanol y NaOH como catalizador, puesto que se trata

de un análisis puerta a puerta y la obtención de los aceites no se incluye en el sistema bajo estudio.

Tabla 21. Evaluación de impacto ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	CO ₂	1,304E+07
	CH ₄	3,260E+05
	N ₂ O	2,937E+04
	CO	1,389E+04
	Total	1,341E+07
Acidificación (kg-eq. H⁺)	SO ₂	6,094E+03
	NO ₂	8,071E+02
	HCl	2,386E+01
	HF	5,196E+00
	NH ₃	3,229E-04
	Total	6,930E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,224E-01
	Nitrógeno (N ₂)	0,000E+00
	Amonia (como N)	1,521E+01
	Amoníaco (NH ₃)	1,916E-03
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	4,770E+03
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	3,348E+01
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	5,082E+01
	Total	4,869E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	3,096E-02
	Formaldehidos	2,336E+00
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,135E+02
	Hidrocarburos	3,378E+02
	Metano (CH ₄)	0,000E+00
	Total	8,536E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	9,238E+00
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,521E+04
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	4,670E+03
	Amonio (NH ₄)	4,396E+00
	Partículas (sin especificar)	3,522E+03
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	3,684E+01
	PM10	7,681E+02
	Total	2,422E+04

Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	5,597E+07
	Gas Natural	6,215E+01
	Total	5,597E+07

Fuente: La Autora.

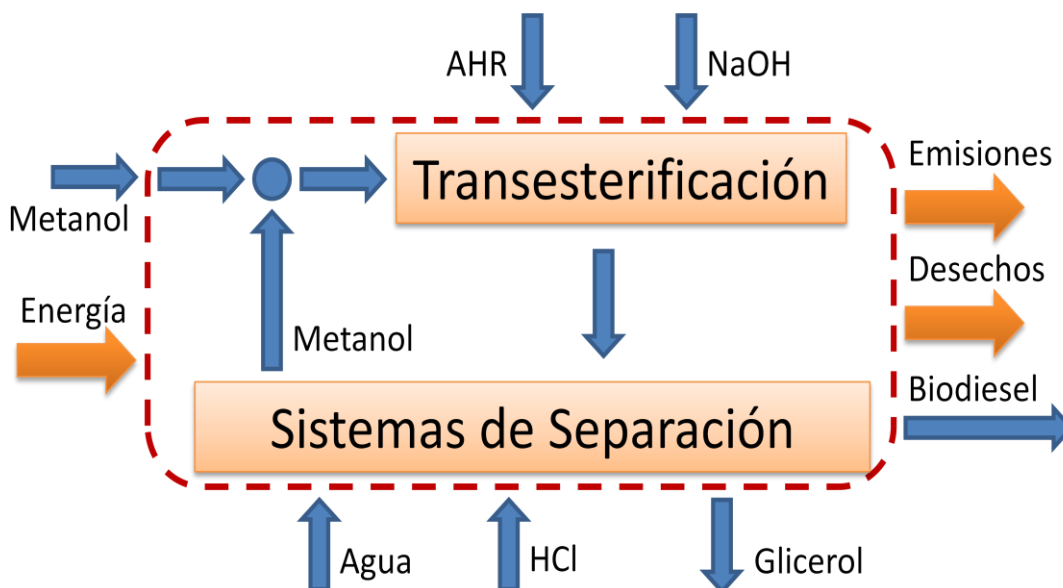


Figura 21. Delimitación del sistema bajo estudio del ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador.

Fuente: La Autora

3.4. EXPANSIÓN DEL SISTEMA

Siguiendo los pasos metodológicos explicados en la sección 2.1, luego de las evaluaciones exergética, económica y ambiental, se realiza la expansión del sistema para analizar las etapas de producción de las materias primas de los procesos que obtuvieron buenos resultados bajo los criterios evaluados. Los casos presentados en 3.3.2 y 3.3.3, resultaron ser no rentables. De entre estos dos casos, el de palma con catálisis heterogénea, desde el punto de vista ambiental y exergético demostró que no aprovecha bien los recursos y que por ende el impacto que genera en el ambiente es alto. Tal y como se había previsto el caso

de producción de biodiesel partiendo de aceite palma crudo y metanol con catálisis homogénea (NaOH), obtuvo buenos resultados en los tres aspectos evaluados. Su evaluación exergética podría mejorarse mediante integración energética, pero esta etapa se deja como recomendación para estudios posteriores.

3.4.1. Inclusión de la producción del aceite crudo de palma

La producción de aceite de palma en Colombia se encuentra principalmente en tres zonas: la oriental, la norte y la central. Cada una de estas regiones aporta el 30% de la producción nacional de aceite crudo de palma.

Para la elaboración de los balances másicos y energéticos de esta etapa se usaron datos suministrados por extractoras de la región central, ubicadas en el Magdalena Medio. Se consideró únicamente como mecanismo de extracción el prensado, puesto que las plantas extractoras de esta región no utilizan la extracción con solvente y a nivel nacional esta tecnología es poco empleada.

El diagrama de proceso general que se utiliza en la mayoría de las extractoras colombianas es el que se presenta en la figura 22.

Con los balances suministrados por las extractoras e información sobre las emisiones promedio de los gases de chimenea de la caldera cuando se opera con gas natural, considerando que los raquis y cascarillas son usados como fertilizantes (subproductos) se realizó el ACV “puerta a puerta” del aceite crudo de palma utilizando el criterio másico para realizar asignación entre el aceite de palma y las almendras o palmiste. La tabla 22 contiene los flujos estimados para producir los 84.124.908 kg / año de aceite crudo de palma requeridos por la planta de producción de biodiesel.

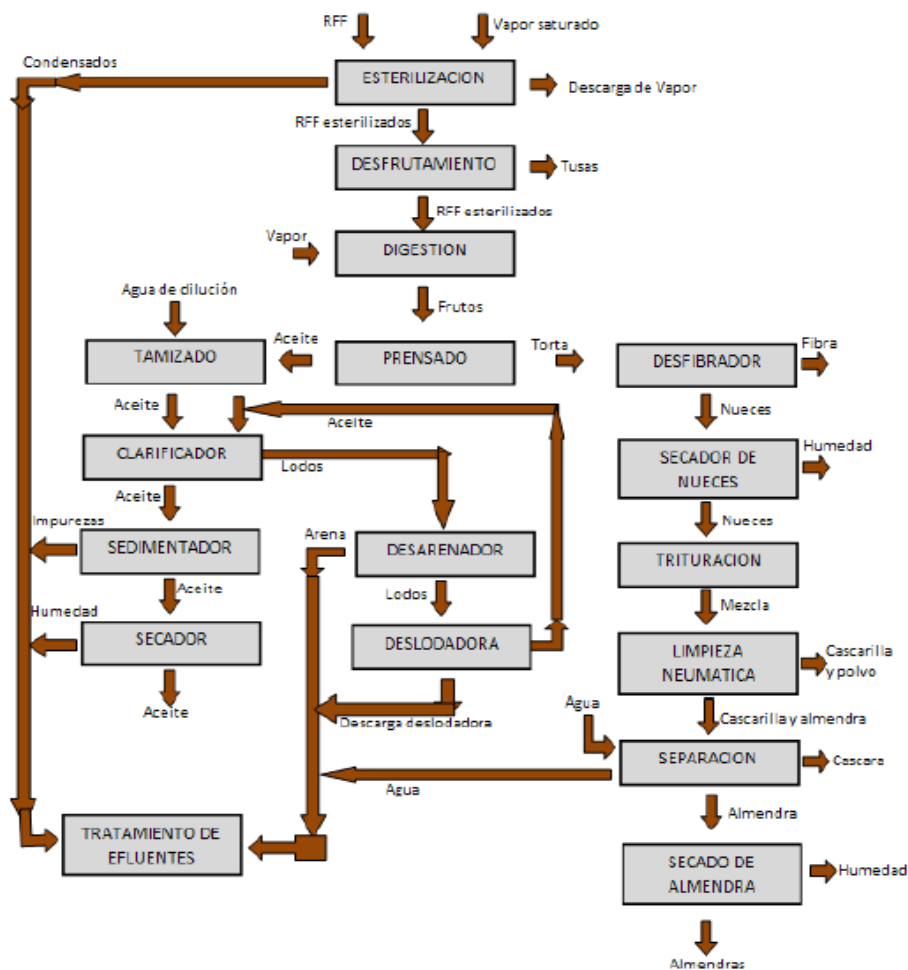


Figura 22. Diagrama general de proceso de extractoras de aceite de palma en Colombia.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 1998.

Tabla 22. Balances de masa para la extractora de aceite de palma.

Aceite Crudo de Palma (kg / año)	84.124.908,00
Racimos de Fruta Fresca (kg / año)	400.594.800,00
Tusas (kg / año)	88.130.856,00
Almendras (kg / año)	22.433.308,80
Cascarilla (kg / año)	12.418.438,80
Cáscara (kg / año)	20.830.929,60
Vapor (kg / año)	125.185.875,00
Agua (kg / año)	114.169.518,00
Energía eléctrica (kWh)	385.187,31

Fuente: La Autora

La evaluación del impacto para la producción de los 84.124.908 kg / año de aceites crudo de palma se presenta en la tabla 23. Nuevamente los factores de caracterización empleados son los que se presentan en el anexo C.

Tabla 23. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta” de la extracción de aceite crudo de palma.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	9,420E+06
Acidificación (kg-eq. H⁺)	2,566E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	3,074E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	4,735E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	9,309E+03
Energía no renovable (MJ energía primaria)	2,561E+08

Fuente: La Autora.

Si comparamos el desempeño ambiental de las extractoras colombianas con las de Malasia, tomando como referencia los balances reportados en Kian Fei *et al.* 2009, se encuentra que la cantidad de kg-eq. CO₂ emitidos en ambos casos es prácticamente la misma (117,75 kg-eq. CO₂/t biodiesel para el caso colombiano y 118,295 kg-eq. CO₂/t biodiesel en Malasia), mientras que el uso de energía no renovable en el caso colombiano es 31 veces mayor. Vale la pena aclarar en este apartado que los datos que se usaron para el presente estudio fueron suministrados por las extractoras antes de implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales con producción de biogás. Cuando se realizaron las visitas los jefes de producción manifestaron que estaban al tanto del bajo desempeño ambiental y que en ese momento se encontraban haciendo mejoras e implementando producción más limpia, entre otros mecanismos de desarrollo limpio.

Respecto a la parte económica, evaluaciones consignadas en tesis, artículos y documentos de FEDEPALMA reportan TIR de retorno entre el 19% y el 35% para plantas extractoras de aceite crudo de palma con capacidades de procesamiento

de racimos de fruta fresca entre 30 y 40 t/h (Uribe 2011, Hernández y Beltrán 2010, Cruz 2010, Chuan y Ani 2007, Owolarafe *et al.* 2002).

3.4.2. Inclusión del cultivo

Una vez realizados los balances másicos y energéticos en la etapa de producción de aceite, es posible estimar el área de cultivo requerida teniendo como dato de entrada la cantidad de racimos de fruta fresca por año consumidos por el proceso de extracción. Puesto que se supuso que la extractora se localiza en el Magdalena Medio, el cultivo debe localizarse en esta misma zona; los racimos de fruta fresca deben ser procesados a la mayor brevedad posible para evitar que su aceite quede con un alto contenido de ácidos grasos libres que produzcan saponificación en el proceso de producción de biodiesel descrito. Por otra parte, los costos de transporte para esta cantidad de material sumados a los costos de producción en el cultivo podrían llegar a ser superiores al precio pagado en la extractora si la distancia es grande. La figura 23 muestra un bosquejo de las acciones contempladas en los ciclos agrícolas estudiados.

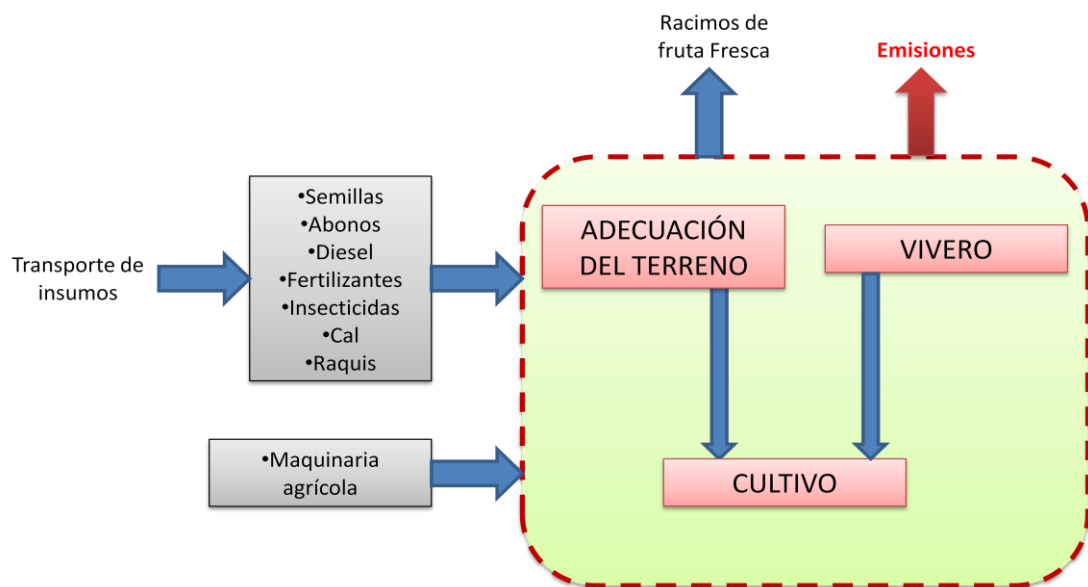


Figura 23. Etapas incluidas en el sistema cultivo.

Fuente: La Autora

Dentro de los límites del sistema se incluyeron todas las labores agrícolas que se realizan en la adecuación del cultivo, así como los procesos de producción del diesel que se utiliza y el transporte de los insumos agrícolas: diesel, insecticidas fertilizantes, cal, raquis y semillas.

Debido a que en esta etapa se pueden generar una gran cantidad de variables en la selección del escenario a evaluar, se especifica que los inventarios realizados proceden de cultivos localizados en el municipio de Puerto Wilches, donde la mayoría de terrenos poseen suelos franco arcillosos y en las áreas donde no hay cultivo de palma africana son terrenos con poca biomasa superficial.

Se estableció que la etapa de crecimiento de la palma es de 5 años, en donde las palmas son sembradas en previvero, luego pasan a vivero y por último son trasladadas y sembradas en la plantación. El período productivo del cultivo se tomó de 25 años.

La variedad de palma considerada es IRHO, originaria de Costa Rica, y se cuantificaron los impactos del transporte de las semillas desde el puerto de San Buenaventura hasta Puerto Wilches, ya que se tomaron como límites geográficos las fronteras colombianas.

Se considera que la aplicación fertilizantes se realiza manualmente (práctica más común en esta zona del país) y que para el plateo se usaron guadañadoras y no herbicidas. El uso de fungicidas y plaguicidas no se contempló, puesto que hay de muchas clases y especializados para un gran número de posibles enfermedades y plagas en el cultivo, además su contribución a los resultados finales es mínima (Da Costa 2005).

La productividad promedio del cultivo en esta zona es de 26 t de racimos de fruta fresca por ha y por año. Con estos factores tecnológicos se calcularon el número

de a que es 15.407,49. Para la evaluación del consumo de fertilizantes y energía se visitaron cultivos en la zona del Magdalena Medio (dos cultivos en Puerto Wilches y 2 en Sabana de Torres) y se tomaron valores promedio por ha. Con los inventarios se realizó la evaluación de impacto que se consigna en la tabla 24.

Tabla 24. Evaluación de impacto del cultivo de palma en el Magdalena Medio.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	9,856E+06
Acidificación (kg-eq. H⁺)	2,132E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	1,100E+04
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	8,585E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	8,765E+03
Energía no renovable (MJ energía primaria)	1,345E+08

Fuente: La Autora.

Al comparar las emisiones de CO₂ y el uso de energía no renovable con lo reportado en Kian Fei *et al.* 2009, para cultivos en Malasia, se encuentra que el impacto en estas dos categorías es considerablemente inferior en el Magdalena Medio Colombiano por la diferencia en prácticas agrícolas. En el caso estudiado se contabilizan 123,2 kg-eq. CO₂/t biodiesel, mientras que los cultivos en Malasia emiten 229, 5 kg-eq. CO₂/t biodiesel. En cuanto al uso de energía no renovable se tiene 1681,25 MJ/t biodiesel para el Magdalena Medio y 2404, 5 MJ/t biodiesel en Malasia.

Por su parte, los estudios económicos de cultivos de palma en Colombia reportan TIR entre 15% y el 37% (Cruz 2010, Melado 2008, Nuñez *et al.* 2007).

3.4.3. Inclusión de la distribución y uso del biodiesel

Para el uso del biodiesel se supuso que éste era transportado hasta la ciudad de Bogotá en carro tanques de 15.000 litros de capacidad, recorriendo una distancia de 504 km. En la ciudad de Bogotá el producto es mezclado con diesel para ser

usado por vehículos de transporte de carga (se supone que es usado en camiones). Las emisiones del diesel se detallan en el anexo A3.

Se realizaron los balances y se cuantificaron las emisiones para tres casos: cuando el biodiesel se usa en mezcla B10, cuando se usa en B20 y cuando se usa solo B100. Los resultados se consignan en la tabla 25.

Tabla 25. Evaluación de impacto etapa de uso y distribución de biodiesel de palma obtenido con catálisis homogénea básica en mezclas: B10, B20 Y B100.

CATEGORÍA DE IMPACTO	B100	B20	B10
Cambio climático (kg-eq. CO₂)	2,49E+08	1,45E+09	2,95E+09
Acidificación (kg-eq. H⁺)	6,81E+04	4,54E+05	9,36E+05
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	4,01E+05	2,16E+06	4,36E+06
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	8,91E+04	5,57E+05	1,14E+06
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	6,21E+05	3,52E+06	7,15E+06
Energía no renovable (MJ energía primaria)	2,25E+08	7,92E+10	1,78E+11

Fuente: La Autora.

3.5. ANÁLISIS “CUNA A CUNA”

El primer paso descrito en la herramienta de análisis representada en la figura 3 es la construcción de escenarios. Para llevar el análisis hasta el nivel “cuna a cuna” se incluyen los ciclos biogeoquímicos en la evaluación como una etapa adicional del ciclo de vida del producto biodiesel. Los ciclos incluidos en este caso de estudio son el del nitrógeno y el del carbono, considerando las emisiones causadas por el cambio del uso del suelo y la recuperación del mismo luego de ser utilizado durante 60 años (2 ciclos de cultivo de palma).

En el desarrollo del cultivo, la planta captura una cantidad de CO₂ desde la atmósfera, el cual tiene varios destinos: la parte fijada en la biomasa se cosecha, la parte fijada en la biomasa que queda en el terreno y la parte que retorna a la

atmósfera mediante el mecanismo de respiración de la planta. Por lo tanto, la verdadera contribución que tiene la planta en la disminución del CO₂ del ambiente, se ve reflejada en el carbono que se fija en el suelo en forma de rizodepósitos (CIEMAT 2005). Teniendo en cuenta que la planta ha fijado un carbono previamente en su crecimiento, las cantidades de CO₂ emitidas provenientes de la combustión del biodiesel, del uso del resto de los co-productos y de los diversos mecanismos de respiración no se contabilizaron como emisiones y se han considerado cero (CIEMAT 2006). Se consideró que existe una fijación neta de C en el suelo, uno para el cultivo de palma y otro para el período de recuperación del terreno luego de que se termina el cultivo (Kuzyakov y Domansky 2000).

El nitrógeno se encuentra en varios compartimientos, principalmente en la planta, en los residuos vegetales, en el nitrógeno mineral y en la materia orgánica húmeda. Existen flujos de nitrógeno entre estos componentes y también con el medio fuera de ellos. Las entradas más importantes son: la fijación biológica de nitrógeno, fertilización y el ingreso por lluvia. Las salidas de mayor magnitud son la exportación, volatilización, desnitrificación y lixiviación. Las emisiones debidas al uso de fertilizantes (N₂O) se calcularon de acuerdo a lo planteado en la metodología IPCC (Audsley *et al.* 2003); además, para calcular las emisiones de NH₃ y NO_x se tomó como referencia ECETOC 2004. Por otra parte, se consideró que existe una fijación neta de N en el suelo debida a la presencia de bacterias no simbióticas que no superan los 15 kg/(ha.año) (Abela 2004).

Las metodologías existentes sobre el cambio del uso del suelo hablan de diferentes grados de emisiones dependiendo del terreno de partida (Cowell 1998, Pimentel *et al.* 1995, Tolbert *et al.* 2002). En el presente trabajo se consideran dos alternativas: partiendo de pastizales y partiendo de bosque terciario (Persson 2012).

Teniendo en cuenta que se tiene una tecnología para producir biodiesel seleccionada, que las extractoras de aceite crudo de palma en Colombia en su gran mayoría solo usan prensado y que los balances se realizaron para cultivos de palma en el Magdalena Medio, el número de escenarios posibles se determina por las variantes en la distribución y uso (tres posibilidades, B10, B20 Y B100) y los dos terrenos de partida considerados (pastizales y bosque terciario). Tomando en cuenta lo anteriormente descrito, los posibles escenarios a comparar son los consignados en la tabla 26.

Tabla 26. Posibles escenarios con las etapas de vida analizadas.

ESCENARIO	Descripción
PAST – B10	Terreno de partida: Pastizales. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B10
BOSQ – B10	Terreno de partida: Bosque terciario. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B10
PAST – B20	Terreno de partida: Pastizales. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B20
BOSQ – B20	Terreno de partida: Bosque terciario. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B20
PAST – B100	Terreno de partida: Pastizales. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B100
BOSQ – B100	Terreno de partida: Bosque terciario. Cultivo: Palma africana en el Magdalena medio. Extracción del aceite crudo de palma: Prensado. Producción del biodiesel: Aceite crudo de palma, metanol, NaOH. Distribución y uso: B100

Fuente: La Autora.

3.5.1. Evaluación técnica, económica y ambiental de los escenarios

Con los escenarios armados es posible evaluar los indicadores técnicos ambientales y económicos mencionados en el apartado 2.2.4 del presente libro. Los indicadores técnicos a evaluar fueron: cantidad de biodiesel por hectárea y la relación entre la energía obtenida (energía renovable) y la energía no renovable gastada en todo el ciclo de vida. Los valores que se obtuvieron para cada uno de los escenarios se presentan en la tabla 27.

Tabla 27. Indicadores técnicos.

	PAST – B10	BOSQ - B10	PAST – B20	BOSQ - B20	PAST – B100	BOSQ - B100
Producción de biodiesel (t / ha)	5,192	5,192	5,192	5,192	5,192	5,192
Energía renovable / energía no renovable	0,017	0,017	0,038	0,038	4,423	4,423

Fuente: La Autora

La TIR verosímil⁶⁰ se evalúa en la etapa industrial, teniendo en cuenta que la TIR hallada en la evaluación económica (27,19%) fue calculada basada en datos de una simulación y para una tecnología probada a escala industrial. Estas consideraciones se incluyen en la evaluación multiplicando la TIR hallada por dos factores de corrección, uno por la calidad de datos y otro por la madurez tecnológica⁶¹. El factor por usar datos de simulación es 0,8 y puesto que la tecnología es la que se utiliza actualmente para producir biodiesel en Colombia el factor de madurez es 1. De esta manera se estimó una TIR verosímil de 21,752%,

⁶⁰Se recurre a la disciplina estadística y dentro de ella a la definición de verosimilitud, pero podría ser también de probabilidad (TIR probable) o de esperanza (TIR esperada) y que tienen en común el multiplicar el indicador por un número entre cero y uno, en función de la confianza, certeza, exactitud y no variabilidad del indicador.

⁶¹La introducción de factores relacionados con la tecnología, que modifiquen el resultado de la TIR, u otro resultado numérico de evaluación (económica o de otro tipo) significan en la práctica la introducción de otras variables y la ampliación de las alternativas a evaluar. No obstante en el presente caso, dado que la tecnología es la misma para todos los escenarios, no se amplían las alternativas.

que es la misma para todos los escenarios puesto que todos ellos tienen la misma tecnología para producción de biodiesel.

La evaluación de impactos ambientales potenciales de los escenarios se realizó mediante la aplicación de la metodología ACV “de la cuna a la cuna”, los resultados obtenidos para la evaluación ambiental están contenidos en la tabla 28. Los perfiles ambientales de cada escenario se presentan en las figuras 24, 25, 26, 27, 28 y 29.

Tabla 28. Resultados de la evaluación ambiental de los escenarios con metodología “cuna a cuna”.

	PAST – B10	BOSQ - B10	PAST – B20	BOSQ - B20	PAST – B100	BOSQ - B100
Cambio climático (kg-eq. CO₂)	1,587E+09	2,110E+09	8,657E+07	6,093E+08	-1,114E+09	-5,910E+08
Acidificación (kg-eq. H⁺)	9,513E+05	9,513E+05	4,689E+05	4,689E+05	8,294E+04	8,294E+04
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	4,304E+06	4,343E+06	2,106E+06	2,145E+06	3,483E+05	3,871E+05
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	1,144E+06	1,144E+06	5,592E+05	5,592E+05	9,135E+04	9,135E+04
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	7,204E+06	7,204E+06	3,579E+06	3,579E+06	6,797E+05	6,797E+05

Fuente: La Autora

3.5.2. Asignación de pesos y selección de la mejor alternativa usando AHP

Los criterios a tener en cuenta para la selección de alternativas son unificados mediante el uso de la metodología AHP, para de un conjunto de indicadores, desembocar en un único indicador. Se aplica la metodología descrita en 2.2.4. (capítulo 2) y los resultados se consignan en la tabla 29.

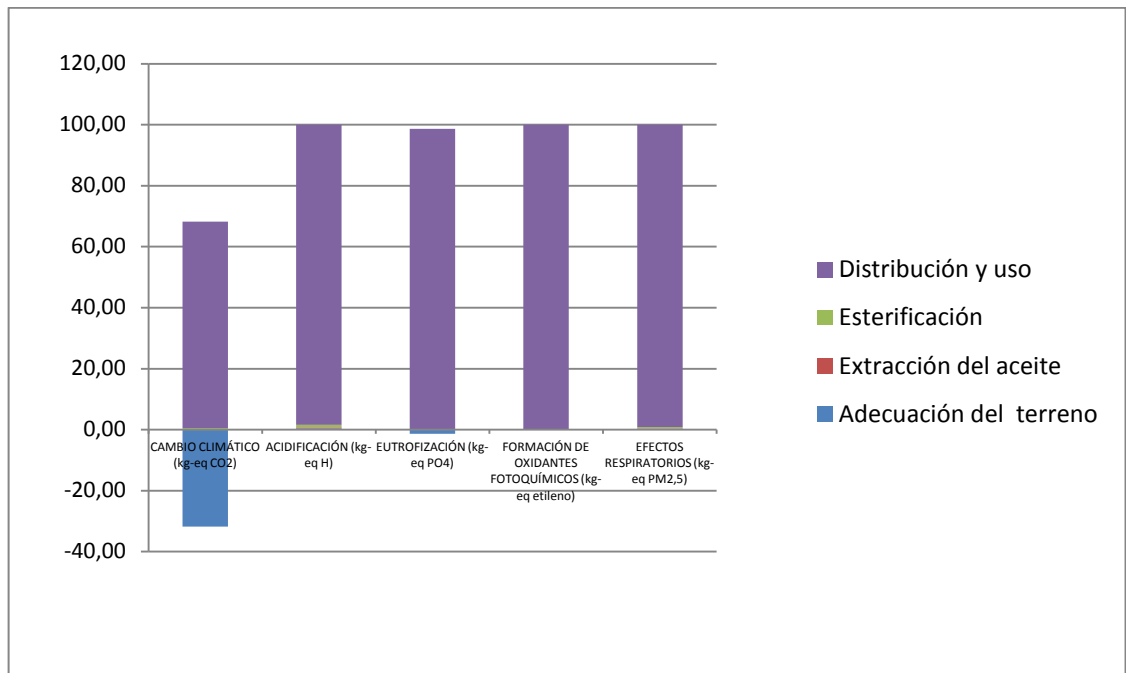


Figura 24. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10.

Fuente: La Autora

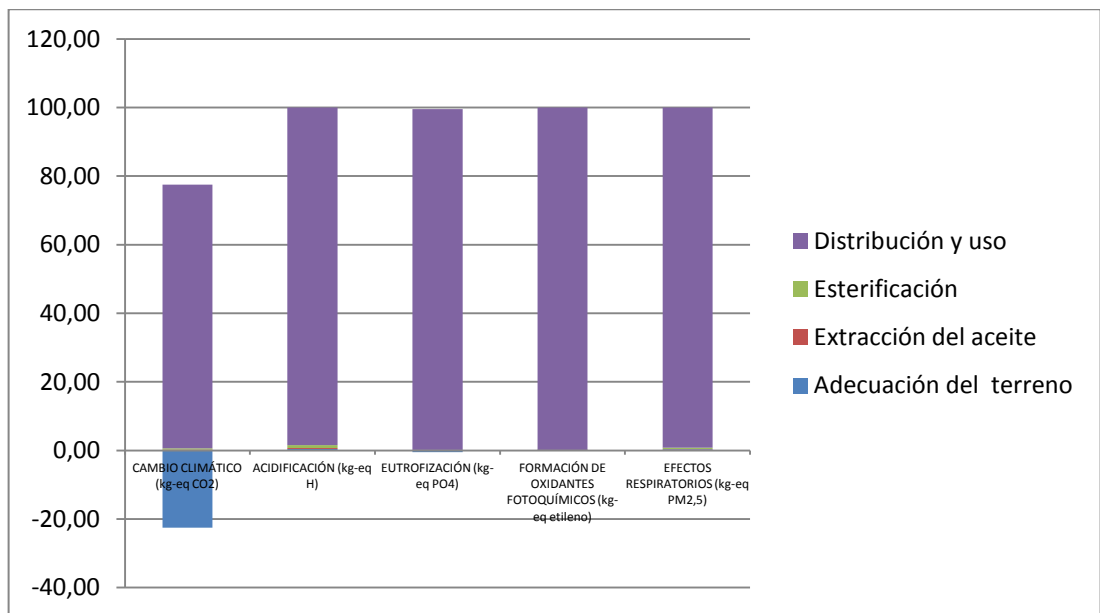


Figura 25. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10.

Fuente: La Autora

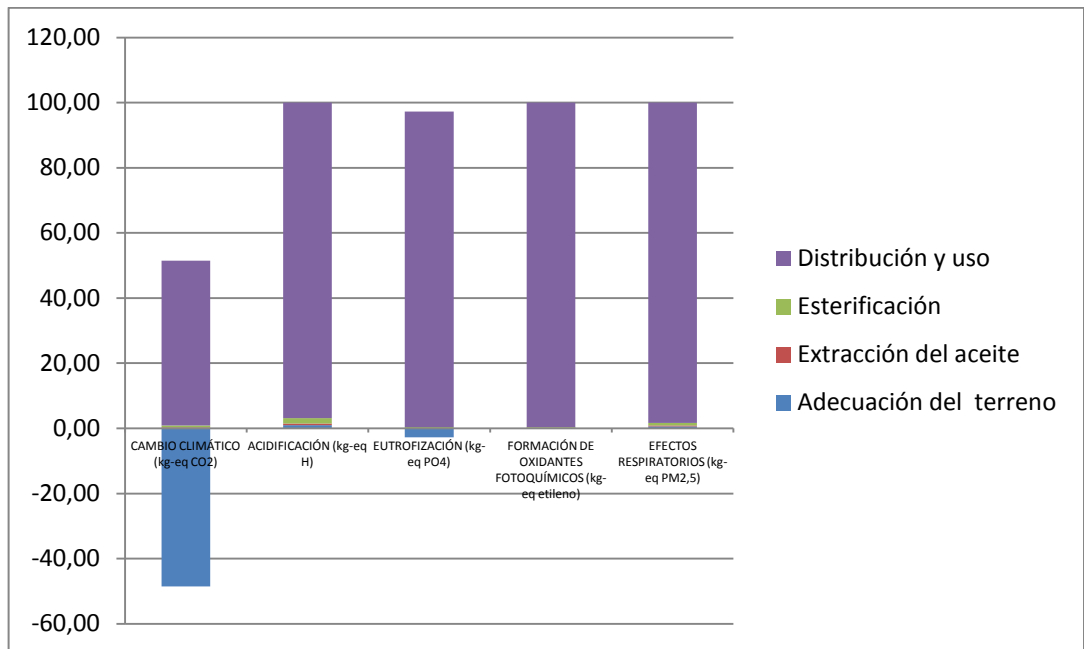


Figura 26. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20.

Fuente: La Autora

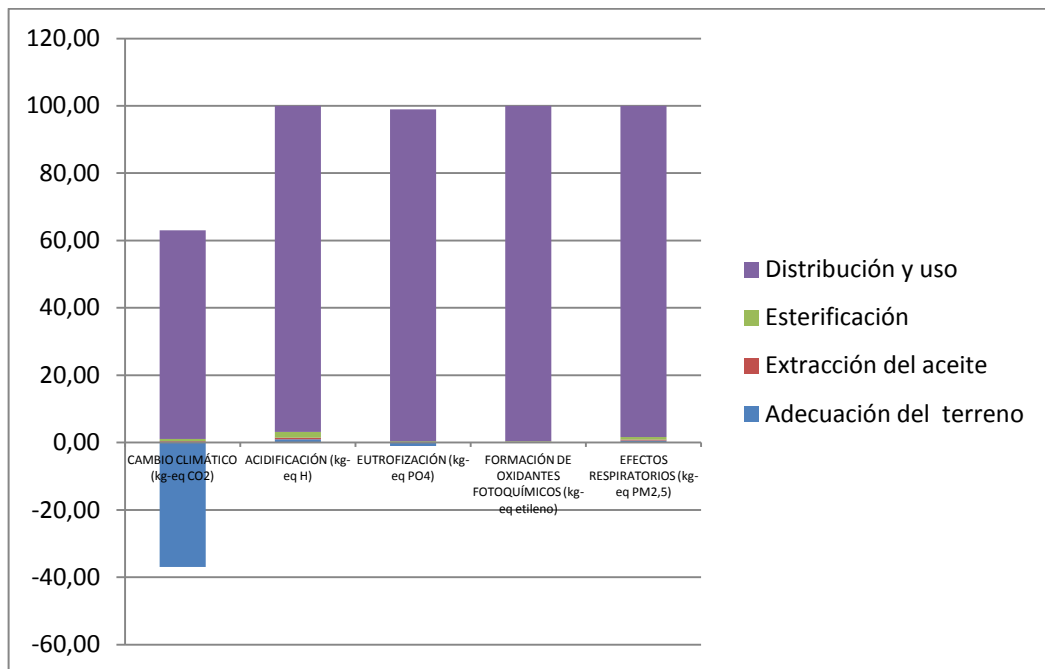


Figura 27. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20.

Fuente: La Autora

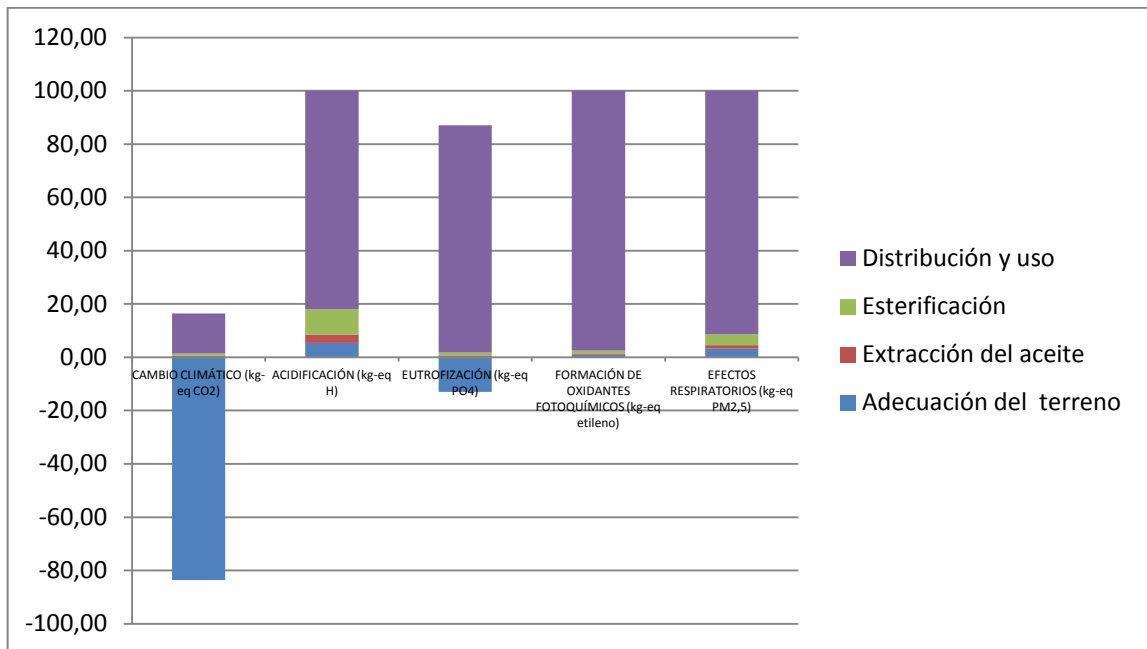


Figura 28. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100.

Fuente: La Autora

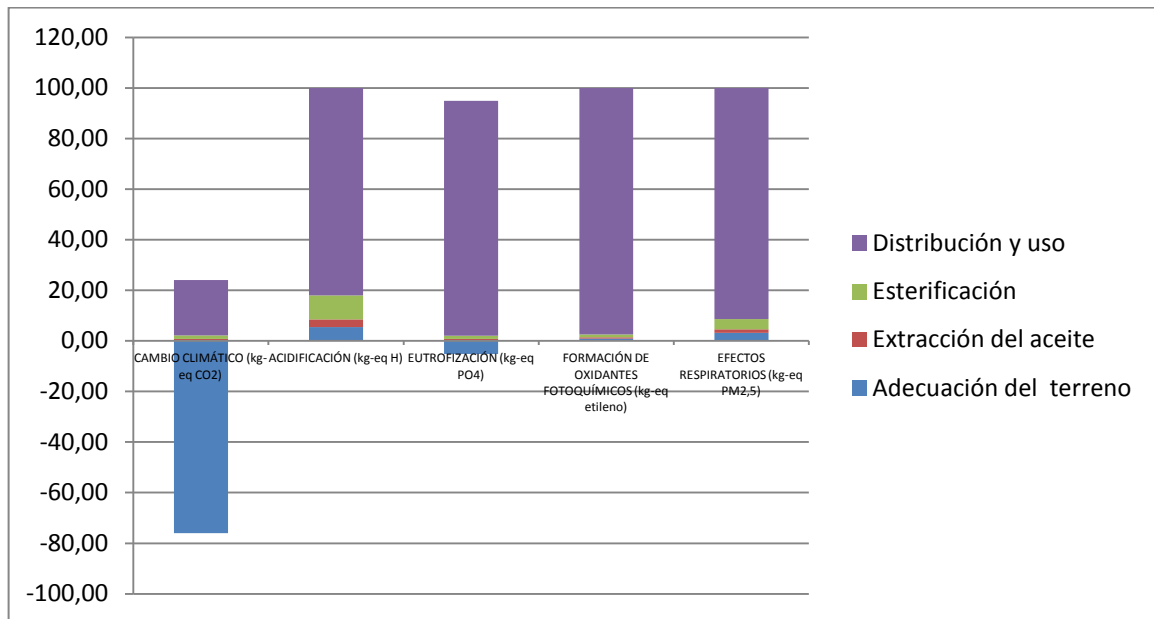


Figura 29. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100.

Fuente: La Autora

Sin embargo, para poder usar esta metodología es necesario asignar previamente pesos a cada uno de los indicadores y subindicadores de categoría. Los tres aspectos, económico, ambiental y técnico, se consideran igualmente importantes y por eso tienen pesos iguales.

Los subindicadores de categoría de impacto ambiental tienen los siguientes pesos: 0,4 cambio climático, 0,2 acidificación, 0,2 eutrofización, 0,1 formación de oxidantes fotoquímicos y 0,1 a efectos respiratorios.

El mayor peso a la categoría de cambio climático se justifica con las imposiciones del mercado europeo por reducir al menos en 35% las emisiones de CO₂ del biodiesel, en comparación con el diesel.

Como criterio económico se tiene un solo indicador y por tanto su peso es 1. Para la evaluación técnica se asigna un peso de 0,5 a cada uno de los dos indicadores. Los puntajes asignados y los resultados hallados teniendo en cuenta los pesos antes mencionados y la metodología AHP se consignan en la tabla 29.

Tabla 29. Evaluación de escenarios y selección de la mejor alternativa.

INDICADOR	SUBINDICADOR	PAST– B10	BOSQ- B10	PAST– B20	BOSQ- B20	PAST– B100	BOSQ- B100
AMBIENTAL (MÁX 1 Y MÍN 0)	CAMBIO CLIMÁTICO	0,2	0,0	0,6	0,5	1,0	0,8
	ACIDIFICACIÓN	0,0	0,0	0,5	0,5	0,9	0,9
	EUTROFIZACIÓN	0,0	0,0	0,5	0,5	0,9	0,9
	FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	0,0	0,0	0,5	0,5	0,9	0,9
	EFFECTOS RESPIRATORIOS	0,0	0,0	0,5	0,5	0,9	0,9
	TOTAL AMBIENTAL		0,066658921	0	0,55690589	0,49024697	0,94910346
TÉCNICO (MÁX 1 Y MÍN 0)	Energía renovable obtenida / energía no renovable usada	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
	Producción de biodiesel	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	TOTAL TÉCNICO	0,501903183	0,501903183	0,50426188	0,50426188	1	1
ECONÓMICO (MÁX 1 Y MÍN 0)	TIR verosímil	1	1	1	1	1	1
	TOTAL	1,568562104	1,501903183	2,06116777	1,99450885	2,94910346	2,8824445

Fuente: La Autora

4. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se consignan primero (en el numeral 4.1) las más notorias ventajas de la herramienta planteada en el capítulo 2 y aplicada en el capítulo 3. Posteriormente (numeral 4.2), se consignan los resultados más significativos de la aplicación de la herramienta a la producción de biodiesel en Colombia y que se destacan entre los presentados en detalle en el capítulo 3.

4.1. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La herramienta desarrollada tiene ventajas de aplicabilidad generalizada y flexible, además de superar limitaciones de las hasta ahora presentadas.

- La herramienta posee amplios alcances, por ser conceptualmente aplicable a cualquier producto (bien o servicio) y puede llegar en cualquier caso a involucrar usos de materiales y energía que finalmente provienen de la naturaleza y finalmente regresan a ella.
- Es posible emplearla desde el inicio (la “idea” o “problema primario”) hasta el final del proceso de toma de decisiones (“diseño final”) asociado al ASP. Para cubrir con la multiplicidad de evaluaciones y alternativas de diseño que se tiene al inicio se debe contar con simuladores.
- Así mismo es aplicable con cualquier nivel de certidumbre, de calidad y de madurez de la información y orientar decisiones desde cómo orientar desarrollo de procesos en etapas de investigación y escalamiento, hasta las de definir la alternativa para estudios finales, construcción y puesta en marcha de instalaciones industriales.
- Involucra la evaluación de impacto ambiental con enfoques o paradigmas alternativos del ACV: “puerta a puerta”, “cuna a puerta”, “cuna a tumba” y

“cuna a cuna”. La selección o combinación es función de la decisión que se pretende tomar.

El solo análisis “puerta a puerta” permite a los diseñadores seleccionar la alternativa de producción más conveniente, económica y ambientalmente, dados unos insumos y un destino inmediato de los productos. Combinando los cuatro enfoques lleva a seleccionar en un contexto, la combinación más recomendable de escenario y tipo de cultivo (tecnologías y localización de las diferentes etapas del ciclo de vida, incluida la producción), y mercado o combinación de mercados alternativos de los productos.

- La amplitud geográfica del escenario que puede ser analizado es flexible en la medida en que se disponga de los datos e información pertinentes⁶².
- Se involucran metas ambientales como objetivo y no solo como una restricción, como ocurre con los métodos propuestos hasta ahora y analizados en el capítulo estado del arte. Se supera la limitación de los casos hasta ahora presentados en los que la restricción toma la forma de imposición de la legislación ambiental existente en los diferentes países, donde se tienen límites de vertimientos y producción de residuos e incluso las de trabajos más recientes, también ya analizados, que proponen formas de introducir criterios ambientales en el diseño de procesos como objetivos pero sin llegar a metodologías claras para lograrlo.
- Permite tomar decisiones multicriterio de diferente grado de complejidad.
- Integra entre sí y genera sinergias de calidad a los balances y análisis de flujos de masa y energía, económico – financieros y de impacto ambiental.

En el caso específico del biodiesel, la aplicación de la herramienta permite análisis comparativos y toma de decisiones sobre producción en diferentes escenarios; a

⁶² El marco geográfico de esta tesis fue el Magdalena Medio Santandereano, una región de Colombia y se escogió entre otros motivos por haber logrado datos e información primaria. El mismo ejercicio se adelantó dentro del marco amplio del trabajo, tomando a Colombia como escenario geográfico general y con el Magdalena Medio, los Llanos Orientales y el Eje Cafetero como regiones comparadas, pero para concluirlo se requieren soportes de datos y de información aún no disponible.

pesar de que para cada uno de ellos se requiere de mucha información de soporte, se pueden abordar escenarios y decisiones de alto interés en Colombia. La limitación general para la aplicación de la herramienta es la falta o imperfección de datos, información y conocimiento:

- En general se deben perfeccionar los modelos para los balances de masa y energía y en particular con análisis exergético para la mayoría de los procesos o etapas involucradas en el ciclo de vida de los productos. Específicamente en el ejemplo desarrollado se cuenta con modelos probados para balances de masa y energía solo para las etapas industriales del ciclo de vida y en cuanto a los modelos para el análisis exergético, que es un componente determinante, solo para la a etapa de producción del biodiesel a partir de aceite de palma; en las demás etapas y rutas se aplican modelos menos desarrollados.
- Se pueden presentar casos en que haya diferencias en la calidad de los datos, información y conocimiento de las diferentes etapas. También desiguales posibilidades y costos para superar las diferencias y con esas heterogeneidades de incertidumbres se deberá tomar decisiones.
- Una alta proporción de las aplicaciones de la metodología se espera que ocurra con proyectos y productos que todavía no han llegado a la escala industrial, cuando las tecnologías no están totalmente desarrolladas y se debe recurrir entonces a simulaciones con información incompleta, con inventarios de impactos ambientales estimados y con base en software con sistemas de información de soporte que no corresponden al escenario de aplicación. En el caso específico del biodiesel en Colombia, se cuenta y se recurre a datos, información y conocimiento sobre procesos y plantas reales, otra vez, solo en cuanto a cultivos, extracción de aceite y producción de biodiesel a partir de aceite de palma; para la higuera, en términos prácticos de escalas industriales, no existe en Colombia la cadena de producción de biodiesel.

- En el frente de la evaluación económica (EE) se puede calificar de aún poco generalizado el conocimiento de los métodos de valoración de los patrimonios y flujos desde y hacia la naturaleza y de incipiente la aplicación de los mismos. Superar las situaciones de cuentas deficientes por subvalorar y hasta de darle valor de cero a la naturaleza, llevará tiempo y esfuerzo, además de exigir superar barreras de intereses y culturales.
- En la medida en que la cadena industrial sea muy amplia y por tanto estén lejos las etapas de empleo de recursos renovables y de descargas finales a la naturaleza, será cada vez más difícil la aplicación del paradigma “de la cuna a la cuna” e incluso “de la cuna a la tumba”. Esto se debe al estado del arte actual de metodologías de medición, valoración y evaluación. En el mejor de los casos se llegará a corrientes que quedarán simplemente como absorbidas por la naturaleza y otras como originadas en ella.
- En muchos casos para varias de las etapas del ciclo de vida se tienen corrientes de insumos para los cuales se deberán tomar datos y resultados de impacto ambiental con métodos ACV diferentes a los “de la cuna a la cuna”. Esta limitación solo se podrá superar en la medida en que se construyan más y mejores bases de datos con análisis de más regiones del mundo y que se vaya generalizando el nuevo paradigma.
En el caso específico de la producción de biodiesel se tiene una cadena industrial cercana tanto al origen natural de los insumos como a la disposición y absorción final de descargas por la naturaleza; es, en el sentido comentado, un caso fácil.

4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA

En el capítulo 3 se usó la herramienta propuesta para analizar la producción de biodiesel en Colombia. Ahí se mencionó que dadas las condiciones climáticas, de suelos y en algunos casos logísticas, se descartaban las opciones de biodiesel a

partir de soya, colza, ajonjolí, oliva, usados y de animales. Por lo que las dos materias primas que se analizan en detalle son: aceite de palma y aceite de higuierilla.

Teniendo en cuenta el análisis de disponibilidad de tierras para la producción de biocombustibles y las condiciones de suelo y climáticas óptima para la producción de higuierilla se identificaron dos zonas del país donde se podría implementar la cadena de producción de biodiesel de higuierilla en Colombia, estas son: magdalena medio, eje cafetero y llanos orientales.

En los trabajos de pregrado Amaya y Becerra 2008, Castro y Figueroa 2009, González y Vargas 2009 y Gómez y Zurique 2009, se cuantificaron los impactos ambientales de los cultivos en estas zonas, encontrándose que los impactos ambientales generados por el cultivo no varían considerablemente dependiendo de la región, pero sí dependiendo del terreno de partida.

La palma de aceite tiene rendimientos de producción de biodiesel por ha superiores a la higuierilla, y puesto que las zonas de los llanos orientales y Magdalena Medio tienen las características necesarias para establecer un cultivo de palma con alto rendimiento, la zona geográfica para el establecimiento de cultivos de higuierilla para producción de biodiesel recomendable es el eje cafetero.

Solo se evaluó con la herramienta una macro localización de cultivo la palma: Magdalena Medio. Para esta oleaginosa de acuerdo al CONPES 3510 DE 2008, hay tierras disponibles en otras regiones: llanos orientales, costa atlántica y costa pacífica, pero debido a la falta de inventarios y a la cercanía para obtener información primaria de los cultivos, se centró el trabajo en la región del Magdalena Medio.

Luego de analizar seis rutas de obtención, dos para palma y cuatro para higuierilla, de las cuales: cuatro usan metanol y dos etanol, cuatro tienen catálisis homogénea y dos heterogénea, cuatro catálisis ácida y dos básica (Amaya y Becerra 2008, Castañeda y Florez 2008, Jaimes y Merlano 2009, Castro y Figueroa 2009, González y Vargas 2009 y Gómez y Zurique 2009), se encontró que:

Referente a las alternativas para convertir aceite de palma e higuierilla en biodiesel

- Todas las tecnologías disponibles necesitan alcohol en exceso. A causa de los grandes volúmenes que hay que recircular en las tecnologías con catálisis heterogéneas, se presentan altos costos de operación y financieros. Los de operación debido a la gran demanda de energía en los equipos de separación y los costos financieros porque los equipos de separación van a ser de mayor tamaño y costo dependiendo de la cantidad de alcohol que hay que reciclar. Es por esto que se necesita investigación en el frente de desarrollo de nuevos y mejores catalizadores, que consigan altas conversiones y ojalá heterogéneos para evitar neutralizaciones en las etapas posteriores a la transesterificación.
- Independientemente de la tecnología para la transesterificación que se use, la etapa de purificación del glicerol es la que tiene mayores costos energéticos. En este sentido hacen falta alternativas para llevar este subproducto a condiciones comerciales y mejorar el desempeño ambiental de la planta.

Referente a los indicadores medidos con la herramienta desarrollada

- Con el desarrollo tecnológico actual, en Colombia solamente es sostenible producir biodiesel de aceite de palma usando catálisis homogénea básica y

metanol. Vale la pena aclarar que esta sostenibilidad está soportada en beneficios tributarios y condiciones especiales de promoción actual de los biocombustibles. Este tipo de proyectos son muy sensibles a los precios de las materias primas y con la problemática de enfermedades de la palma como la pudrición de cogollo, Colombia no puede depender únicamente de esta materia prima para producir biodiesel. Por esto se hace necesaria una diversificación de la canasta bioenergética nacional y no se deben descartar otras posibles alternativas.

- El biodiesel de higuera no es actualmente una alternativa sostenible a causa del alto precio del aceite de higuera. Actualmente Colombia produce poco aceite de higuera y la mayor parte del consumo de este producto en el país se abastece con importaciones.
- La etapa que más emisiones genera en todos los escenarios y todas las categorías de impacto es la de distribución y uso, por el alto uso de combustible debido a la distancia que deben recorrer los camiones. Partiendo de esta conclusión es recomendable realizar la evaluación para cuando el biodiesel se distribuye y transporta usando oleoductos y para cuando se localizan todas las etapas del ciclo de vida en una sola región.
- La integración de ciclos biogeoquímicos solo reduce los impactos en las categorías de cambio climático y eutrofización.
- Un escenario en el que se obtiene un balance “neuro” (emisiones netas cero) de carbono es producir biodiesel de palma proveniente de zonas que antes eran pastizales con poca cobertura vegetal y, distribuirlo y transportarlo en mezclas B-20 (mínimo).
- Cuando en el escenario se incluye que solo se utiliza biodiesel para la distribución y transporte del producto con B-100, se logra balance positivo de carbono, tanto para cuando la palma se cultiva en pastizales como cuando se hace en bosque terciario.

5. CONCLUSIONES

De la lectura del documento en cuanto a la metodología y a presentación y análisis de resultados, puede quedar la impresión de que primero se desarrolló la metodología y luego se aplicó. Del orden y forma de presentación de los objetivos puede quedar la impresión de que primero se adelantó un ejercicio con el proceso de producción de biodiesel en Colombia y luego la experiencia se trasladó a una descripción general de la metodología. No obstante, en la práctica los dos objetivos y tareas se fueron adelantando simultáneamente, en un proceso sinérgico de sucesivos cambios de frente.

Sobre la validez de la hipótesis:

- Se desarrolló una herramienta que integra ASP con paradigma “de la cuna a la cuna”, ASP con análisis exergético y EE, y se demostró analíticamente que tiene mejoras cualitativas con respecto a las preexistentes, en cuanto permite decisiones más complejas sobre proyectos industriales en escenarios multivariados.
- Se aplicó la herramienta desarrollada a la producción de biodiesel en el escenario de Colombia, con resultados que hacen visible su mayor potencialidad.

Sobre el Logro de Objetivos

- Se integraron y armonizaron los modelos, a través del concepto de sucesiva expansión del proceso industrial, partiendo de la obtención del biodiesel a partir de aceites vegetales, incluyendo sucesivamente las demás etapas y pasando gradualmente de ACV “Puerta a Puerta”, a ACV “cuna a puerta”, a ACV “cuna a Tumba” y a ACV “cuna a cuna”.

- Se propuso una herramienta de aplicación ampliada a procesos industriales y se demostró analíticamente sus ventajas y valor agregado.
- Como indicadores que solo pueden ser cuantificados con la integración se determinaron: CO₂ equivalente total (todo el ciclo de vida) emitido por unidad de producto; eutrofización, acidificación, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios totales. Se desarrollaron y aplicaron los métodos para determinarlos.
- Para la producción de biocombustibles, con diversidad de combinación de variables y escenarios, se desarrollaron y/o adoptaron los modelos de ASP (con análisis exergético el de producción de biodiesel a partir del aceite de palma con dos alternativas tecnológicas y para higuierilla con una alternativa), ACV y EE de cada una de las etapas del ciclo de vida: procesos biogeoquímicos que preceden al cultivo (asociados al cambio de uso del suelo), procesamiento industrial, uso del producto, disposición final de residuos; procesos biogeoquímicos que derivan de las etapas anteriores.
- Se aplicó y validó la herramienta de análisis para tres escenarios de la economía – ecología colombiana: dos escenarios de biodiesel de palma africana y un escenario de biodiesel de higuierilla.
- Entre las decisiones que pueden ser tomadas con la herramienta integrada desarrollada están: definir un mapa de los territorios en Colombia donde es recomendable implantar los cultivos hacia biodiesel; si se puede producir en Colombia biodiesel que cumpla la directriz Europea y demostrarlo; determinar escenarios y condiciones que permitan obtener certificaciones bajo normas que muy probablemente serán exigidas; validar con datos, información y conocimiento, paradigmas ambientalistas como “el monocultivo de la palma es ambientalmente desastroso”, o “producir biodiesel a partir de aceite de higuierilla es mejor que a partir de aceite de palma porque no se compite con la seguridad alimentaria”.

6. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se formulan a continuación están todas relacionadas entre sí y se presentan con diferentes orientaciones: hacia el perfeccionamiento de la metodología desarrollada y ampliación de su ámbito de aplicación, incluyendo el frente de los biocombustibles; hacia sugerir orientación y temas de nuevas investigaciones y tesis doctorales; hacia identificación y desarrollo de frentes interdisciplinarios de trabajo.

Perfeccionamiento de la Metodología Desarrollada

- a) Generalizar los modelos de análisis exergético. Una mejora muy significativa es el desarrollo e integración de modelos de análisis exergético para los procesos correspondientes a cada una de las etapas del ciclo de vida y para cada una de las combinaciones de variables y escenarios.
- b) Involucrar nuevos indicadores relacionados con los límites de la resiliencia y de la irreversibilidad (Rockström et al. 2009, Groffman et al. 2006, Briske et al. 2005) para que determinadas variables se mantengan a prudente distancia de la capacidad del planeta para soportarla o absorberlas y de los puntos de daño sin retorno⁶³. Entre ellos se perfila el del albedo⁶⁴ planetario y local como de interesante y necesaria consideración y más significativo que los de GEI y CC⁶⁵.

⁶³ Ya se hace con los indicadores de gases de efecto invernadero (que las concentraciones no lleguen a valores críticos), de calentamiento global (mantenerse a distancia prudente de la temperatura crítica) y los de cambio climático (ozono en la atmósfera, cantidad de agua en el ciclo y relacionado con ello el tamaño de los cascos polares y de los glaciares, máximos y mínimos de precipitaciones, a la prudente distancia de valores críticos).

⁶⁴ Fracción de la energía incidente proveniente del sol que se refleja al espacio.

⁶⁵ De hecho el albedo es reconocido como la variable de la que depende directamente la temperatura del planeta, sobre las hipótesis, en primer lugar de que la cantidad de calor que capturan los GEI es mínima con la que deja de disiparse al espacio con pequeños cambios del albedo planetario y, en segundo lugar que al centrar la atención en GEI y CC en la actualidad se está concentrando la atención solo en una parte muy pequeña del paquete de longitudes de onda y frecuencia del espectro solar, lo que significa que solo

- c) Adoptar interdisciplinariamente el desafío de integrar el ELCA (Environmental Life Cycle Analysis) con el SLCA (Social Life Cycle Análisis), de la mano de tendencias hacia la integración de los procesos de gestión (incluida la gestión ambiental), de la creciente importancia de la responsabilidad social empresarial y de la fuerza que han adquirido propuestas asociadas a la pirámide de la responsabilidad social y al Pacto mundial en el ámbito de la ONU. Ver figuras 30 y 31.



Figura 30. Pirámide de responsabilidad social.

Fuente: La Autora

- d) Adoptar interdisciplinariamente el desafío del enfoque de Economía Ecológica, con pretensiones de apoyar el desarrollo sostenible.

observamos los cambios de temperatura y los balances de calor, cuando son críticas para la vida del planeta otras variables asociadas al balance de energía global asociado al total del espectro solar y a las densidades de flujo de cada uno de los intervalos de frecuencia y longitud de onda, tanto incidente como reflejada (de ahí la importancia del albedo no solo calórico sino de otros componentes del espectro y del total del espectro).

- i. Identificar y conocer la fenomenología de los sectores o componentes de la naturaleza y de los intercambios másicos, energéticos y funcionales entre ellos.
- ii. Identificar, medir, modelar, simular y “prospectar” los flujos de masa y energía entre los sectores ecológicos y los sectores económicos.
- iii. Identificar y conocer la fenomenología de intercambio de relaciones funcionales, uni y di direccionales entre los sectores ecológicos y los económicos. El nombre que reciben esas relaciones funcionales para el análisis económico es el de SERVICIOS AMBIENTALES.
- iv. Desarrollar y aplicar metodologías de valoración tanto de los patrimonios ambientales como de los flujos másicos, energéticos y funcionales entre los sectores económicos y ecológicos.
- v. Propender y lograr que los valores determinados en 4. Entre en las cuentas nacionales y empresariales.
- vi. Generar y consolidar los mecanismos para que los resultados de 4. Y 5. Influyan, sean tenidos en cuenta en la toma de decisiones sobre proyectos y acciones.

Ampliación del Ámbito de Aplicación de la Metodología a Biocombustibles

a) Aplicar la metodología desarrollada en escenarios o marcos geográficos diferentes, más amplios o más restringidos.

b) Introducir Análisis Exergético con la producción de biodiesel a partir de aceite de palma con tecnologías diferentes a las presentadas con análisis exergético, es una primera mejora que plantea desafíos desde la experimentación hasta el ASP a nivel de detalle.

- Hacerlo con la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera, o de otras fuentes de aceites vegetales, merece el mismo comentario del párrafo anterior y representa un campo muy amplio de trabajo.



Figura 31. Pacto mundial de la ONU en responsabilidad social.

Fuente: ONU.

- Hacerlo con las etapas industriales de materias primas y de tratamiento de descargas es algo similar en términos conceptuales a lo descrito en los dos párrafos anteriores.
- Hacerlo con las etapas que involucran procesos biogeoquímicos es una tarea interdisciplinaria que en términos de hipótesis es llevar el ASP a dichos procesos y/o involucrar esos procesos con sus operaciones unitarias o unidades de proceso, en los simuladores y modelos de ASP.

c) Para investigaciones relacionadas con energía en general, lo del albedo es de particular importancia, en particular dentro de la temática y la utopía de energías renovables y ambientalmente amigables; la inclusión del albedo en el análisis implica la ampliación del sistema en análisis y reconocer que energéticamente el planeta tierra no es un sistema aislado, en contra del supuesto implícito en la mayoría de los análisis energéticos tradicionales que pretenden explicar y resolver los problemas ambientales planetarios y entre ellos los de cambio climático.

Para investigaciones relacionadas con ACV y biocombustibles la pertinencia es mayor y representaría cambiar los paradigmas al involucrar más al sol en los balances y estudios de los procesos biogeoquímicos. Con un enfoque significaría añadir al sol como una etapa más a las recorridas para producir energía y reconocer que para algunos efectos se debe superar el paradigma del “CICLO DE VIDA”.

En términos más cercanos al contexto de las investigaciones hacia decisiones sobre si producir o no biocombustibles, comprar o no biocombustibles provenientes de otros países o continentes, adquiere mayor importancia relativa lo relacionado con el cambio de uso del suelo y con el escenario geográfico de obtención de las materias primas; así por ejemplo, la disponibilidad de flujos de energía solar promedios y su distribución a lo largo del año, será una variable con mayor importancia.

d) La producción, distribución y uso de energía en general y en particular de biocombustibles es uno de los sectores más observados y criticados por la falta de responsabilidad social, por las directas repercusiones sobre la equidad (el consumo de energía per cápita es una de las variables en las que se observa mayor inequidad en el mundo y dentro de cada país), sobre la salud, sobre el empleo y sobre la calidad de vida.

e) No es exagerado plantear que la integración entre ASP, EE Y ACV corresponde a una manera de adelantar el programa antes descrito, centrandó la atención en un determinado producto (bien o servicio).

GLOSARIO

A: factor de frecuencia.

ACV: análisis de ciclo de vida.

ACP: aceite crudo de palma.

AHP: analytical hierarchy process (proceso analítico jerárquico).

AHR: aceite de higuera refinado.

ASP: análisis y síntesis de procesos.

β : relación entre la exergía química y el LHV de la sustancia orgánica seca (adimensional).

BOSQ-B10: escenario con bosque terciario como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B10.

BOSQ-B20: escenario con bosque terciario como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B20.

BOSQ-B100: escenario con bosque terciario como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B100.

$C_{\text{Ambiental}}$: calificación ambiental.

$C_{\text{Económico}}$: calificación económica.

C_{Global} : calificación global.

C_{M} : costos de mantenimiento.

C_{MO} : costos de personal.

C_{MP} : costos de materias primas.

C_{MOQ1} y C_{MOQ2} : costos de mano de obra para el tamaño de planta 1 y tamaño de planta 2 respectivamente.

C_{msoh} : concentración de metanol.

COP\$: pesos colombianos.

CPM: critical path method (método de la ruta crítica).

C_{S} : valor calorífico del sulfuro.

C_{SI} : costos en servicios industriales.

C_{Taj} : costos totales antes de impuestos.

C_{Tdi} : costos totales después de impuestos.

$C_{\text{Técnico}}$: calificación técnica.

C_{tg} : concentración de triglicéridos.

CUMP: costos unitarios de materias primas.

Cuna a cuna: denominación que se le da a análisis de ciclo de vida que parten y terminan en la misma etapa. Para cerrar el ciclo se incluyen los ciclos propios de la naturaleza (ciclos biogeoquímicos).

Cuna a tumba: denominación que se le da a análisis de ciclo de vida que parten en la extracción de las materias primas y terminan con el uso del producto.

CUSI: costos unitarios de servicios industriales.

ε : eficiencia exergetica.

E_a : energía de activación de la ecuación de Arrhenius.

E_{Chi} : exergía química estándar de la sustancia i .

$E_{CHtotal}$: la exergía química.

E_d : exergía destruida.

EE: evaluación económica.

E_{fis} : exergía física.

ELCA: environmental life cycle analysis (análisis de ciclo de vida ambiental).

E_p : exergía del producto.

EMPA: instituto de investigación suizo para ciencias de materiales y tecnología.

EPA: environmental protection agency (agencia de protección ambiental).

EPC: engineering procurement construction (una traducción no literal sería un proyecto definido y aprobado por el agente económico que lo estudia y en vía de construcción e iniciación de operación).

E_r : exergía del recurso.

EV_i : cantidad de emisión o vertimiento i .

F_a : factor de ajuste para tener en cuenta otros costos diferentes a costos de mantenimiento, personal, materias primas y servicios industriales.

FEL: front-end loading (una traducción no literal sería un proyecto en etapa de definición o acomodamiento a los intereses del agente económico que lo analiza).

F_{IP} : tasas de impuestos al patrimonio.

F_{IG} : tasas de impuestos a las ganancias.

F_M : factor para evaluar los costos de mantenimiento que depende de la tecnología.

F_{StoX} : valor presente del valor de salvamento en el año x .

GEI: gases de efecto invernadero.

GWP_{100} : factores de caracterización para evaluar efecto de gases de invernadero a 100 años.

H: entalpía.

HAZOP: hazard and operability analysis (análisis de riesgos y operaciones).

IA: impacto ambiental.

I_{CB} : impactos ambientales de los ciclos biogeoquímicos envueltos en las etapas productivas.

I_{CP} : impacto ambiental potencial de la construcción de la planta.

I_{EVi} : impacto ambiental potencial por unidad de emisión o vertimiento i .

I_f : inversión fija.

I_{MP} : impacto ambiental potencial de las materias primas.

I_{MPi} : impacto ambiental potencial por unidad de materia prima i .

I_P : impacto ambiental potencial generado por las emisiones y vertimientos de la planta industrial.

I_{Py} : impacto ambiental potencial por unidad de producto y .

I_{SI} : impacto ambiental potencial de los servicios industriales.

I_{Sin} : impacto ambiental potencial por unidad de servicio industrial n .

ISO: international organization for standardization (organización internacional para estandarizaciones).

I_t : inversión total.

I_T : impacto ambiental total.

I_{UP} : impacto ambiental potencial del uso de los productos.

I_w : inversión de trabajo.

L : longitud.

L_d : factor de Lang para inversión directa.

L_i : factor de Lang para calcular inversión fija partiendo de la inversión directa.

L_w : factor de Lang para calcular inversión de trabajo partiendo de inversión fija.

LHV: lower heating value (valor calorífico inferior).

LHV_{org}: valor calorífico inferior de la fracción orgánica por kilogramo. m_e: flujo másico de entrada.

M: masa.

MCDA: metodologías de decisión mediante análisis multi criterio (por su sigla en inglés, multi criteria decision analysis).

m_s: flujo másico de salida.

MP_i: cantidad de la materia prima i usada.

P: presión.

(P/F)_i: factor de matemáticas financieras para calcular el valor presente a partir de un valor final del año i.

PAST-B10: escenario con pastizal como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B10.

PAST-B20: escenario con pastizal como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B20.

PAST-B100: escenario con pastizal como terreno de partida, cultivo de palma en el Magdalena Medio, prensado como método de extracción del aceite, producción de biodiesel con metanol y NaOH como catalizador, y uso del biodiesel en mezcla B100.

PERT: program evaluation and review technique.

P_{MPi} : precio unitario de la materia prima i .

P_{Sin} : precio unitario del servicio industrial n .

PMP: preparación de las materias primas.

PND: plan nacional de desarrollo.

Pozo a pozo: denominación que se le da a análisis de ciclo de vida de combustibles que parten y terminan en la misma etapa.

Pozo a rueda: denominación que se le da a análisis de ciclo de vida de combustibles que parten en la extracción de las materias primas y terminan con el uso del producto.

P_{Pm} : precio unitario del producto m .

Pr_m : cantidad de producto m obtenida.

Pr_y : cantidad de producto y obtenido.

Pu : purificación.

Puerta a puerta: denominación que se le da a análisis de ciclo de vida que se centran únicamente en el proceso de manufactura del producto.

Q : capacidad instalada.

R : constante de los gases ideales.

$-r$: velocidad de reacción.

S : entropía.

$\$$: pesos colombianos.

Sep: separación.

SGA: sistemas de gestión ambiental.

SI_n: cantidad de servicio industrial n.

SLCA: social life cycle analysis (análisis de ciclo de vida social).

SLD: social licence in design (diseño con licencia social).

Θ: tiempo.

T: temperatura.

TAM: tasa atractiva mínima.

T₀: temperatura de referencia.

Tr: transformación.

TIR: tasa interna de retorno.

TRI: tiempo de recuperación de la inversión.

U: utilidades.

U_i: son las utilidades del año i.

U.L.A.I: utilidades legales antes de impuestos.

UPME: unidad de planeación minero energética.

U.R.A.I: utilidades reales antes de impuestos.

U.R.D.I: utilidades reales de impuestos.

VPN: valor presente neto.

VPN_x: valor presente del proyecto en el momento de iniciar operaciones cuando se llevan x años de operación.

V.P.V.sto: valor presente del valor de salvamento.

W: trabajo.

w: fracción másica.

x: composición.

Y: ingresos.

y_i: fracción molar de la sustancia i.

BIBLIOGRAFÍA

Abela, J.E. Importancia y función de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en el cultivo de soya. 2004. http://www.fundacruz.org.bo/uploads/modules/multimedia/2012/01/10_Fijacion_biologica_209.pdf. Consultada el 12 de Julio de 2012.

Acevedo, P., Acevedo, L., Kafarov, V. Joint application of process system engineering, life cycle assessment and economic evaluation for sustainable biodiesel production from palma and castor oil. 5th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of energy, water and environment system. Dubrovnik (Croacia). 2009

Acevedo, P., Amaya, B., Becerra, S., Kafarov, V. Well to well life cycle assessment for biodiesel production. 8th World Congress of Chemical Engineering. Montreal (Canada). 2009.

Agenda 21. The United Nations Programme of Action from Rio. www.un.org/esa/olsol/agenda21. Consultado el: 19 de Julio de 2012.

Aguilera, R., Sepúlveda, F. La Evaluación de proyectos de inversión para la toma de decisiones. Disponible en: <http://www2.Udec.cl/~rea/REVISTA%20PDF/Rev64/art5rea64.pdf>. Consultado el 30 de Mayo de 2012.

Ahmad, A.L., Mat Yasin, N.H., Derek, C.J.C., Lim, J.K. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 584-593, 2011.

Akkayaa, A., Sahinb, B., Erdema, H. Exergetic Performance Coefficient Analysis of a Simple Fuel Cell System. *Int. J Hydrogen Energy* 32: 4600, 2007.

Amaya, B., Becerra, S. Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna”. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2008.

Alston, K. Cradle to cradle design initiatives: lessons and opportunities for prevention through design. *Journal of Safety Research* 39: 135-136. 2008.

Alvarado, S., Gherardelli, C. Input-output exergo-economic optimization of multicomponent-multiproduct system methodology. *Energy* 19(2): 251-258, 1994.

Álvarez Cifuentes, M. La cadena del valor en la industria del petróleo y la investigación. Documento de trabajo Universidad Industrial de Santander. 2012.

Amaya, B., Becerra, S., Acevedo, P., Kafarov, V. “Well to well” life cycle assessment for biodiesel production. 8th World Congress of Chemical Engineering. Canadá, 2009.

Apostolakou, A.A., Kookos, I.K., Marazioti, C., Angelopoulos, K.C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. *Fuel Processing Technology* 90: 1023-1031, 2009.

Ardente, F., Cellura, M. Economic allocation in life cycle assessment: The state of the art and discussion of examples. *Journal of Industrial Ecology* 16(3): 387-398, 2012.

Arvidsson, R., Fransson, K., Froling, M., Svanstrom, M., Molander, S. Energy use indicators in energy and life cycle assessment of biofuels: review and recommendations. *Journal of Cleaner Production* 31: 54-61, 2012.

Audsley, E. Harmonization of environmental life cycle assessment for agriculture: Final Report. European Commission DG VI Agriculture. 2003.

Ayres R.U., Ayres W. Accounting for resources 2: the life cycle of materials. Cheltenham, UK and Lyme MA: Edward Elgar, 1999.

Azapagic, A., Millington, A., Collett, A. A methodology for integrating sustainability considerations into process design. *Chemical Engineering Research and Design* 84(A6): 439-452, 2006.

Benavides, P.T., Diwekar, U., Salazar, J.M. Comparing continuous and batch process design under uncertainty for biodiesel production. AIChE Annual Meeting – 11AIChE, Minneapolis; Octubre de 2011. Conference Proceedings. ISBN: 9780816910700. Bender, M. Economic feasibility review for community-scale farmer cooperatives for biodiesel. *Bioresource Technologies* 70: 81-87, 1999.

Benoist, A., Dron, D., Zoughaib, A. Origins of the debate on the life-cycle greenhouse gas emissions and energy consumption of first-generation biofuels – A sensitivity analysis approach. *Biomass and Bioenergy* 40: 133-142, 2012.

Borjesson, P., Tufvesson, L.M. Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *Journal of Cleaner Production* 19: 108-120, 2011.

Braungart, M., McDonough, W., Bollinger, A. Cradle-to-Cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production* 15 (13-14): 1337-1348. 2007.

Brunet, R., Carrasco, D., Muñoz, E., Guillén-Gosálbez, G., Katakis, I., Jimenez, L. Economic and environmental evaluation of microalgae biodiesel production using process simulation tools. *Computer Aided Chemical Engineering* 30: 547-551, 2012.

Burnett, R., Hansen, D.R. Ecoefficiency: Defining a role for environmental cost management. *Accounting, Organizations and Society* 33: 551-581. 2008.

Busto, M., Shimizu, K., Vera, C., Grau, J. Influence of hydrothermal aging on the catalytic activity of sulfated zirconia. *Applied catalysis* 348: 173-182, 2008.

Castañeda, A., Flórez, M. Aplicación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir del aceite de palma empleando la metodología de la cuna a la cuna. Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2008.

Castillo, E. Modelo matemático para la evaluación de la agresividad ambiental de sectores industriales colombianos. Tesis doctoral. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2000.

Castro, J., Figueroa, R. Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera en el eje cafetero. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2009.

CIEMAT. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase I. Análisis de ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. España: Ministerio de medio ambiente – CIEMAT. 2005.

CIEMAT. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase II. Análisis de ciclo de vida comparativo de biodiesel y diesel. España: Ministerio de medio ambiente – CIEMAT. 2006.

Chemstations, CHEMCAD. Chemstations Inc., Houston, <http://www.chemstat.net>.

Chen, T., Yang, Y. Interpretation of non linear empirical data based process models using global sensitivity analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 107: 116-123, 2011.

Ching-Hung, C., Wei-Heng, C., Chieh-Ming, J.C., Shih-Ming, L., Chien-Hsiun, T. Biodiesel production from supercritical carbon dioxide extracted Jatropha oil using subcritical hydrolysis and supercritical methylation. *The Journal of Supercritical Fluids* 52: 228-234, 2010.

Choudhary, A.K., Harding, J.A., Tiwari, M.K. Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge. *J Intell Manuf* 20: 501-521, 2009.

Chuan, C.W., Ani, F.N. The economic evaluation of the production of oil palm. *Journal Teknologi* 46(A): 43-52, 2007.

CONPES – Documento 3510. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación, 2008.

Constantinou, L., Gani, R. New group contribution method for estimating properties of pure compounds. *AIChE Journal* 40: 1-15, 1994.

Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia. Programa estratégico para la producción de Biodiesel – Combustible automotriz – a partir de aceites vegetales: Informe final. Bogotá, CORPODIB, 2004.

Costa, P., Amalia, L., Marchettu, S., Albornoz, A. Effect of iron on the properties of sulfated zirconia. *Applied Catalysis* 334: 187-198, 2008.

Costanza, Robert (ed); *Ecological Economics (The Science and Management of Sustainability)*; Columbia University Press, New York; 1991.

Cossio-Vargas, E. Hernandez, S., Segovia-Hernandez, J.G., Cano-Rodriguez, M.I. Simulation study of the production of biodiesel using feedstock mixtures of fatty acids in complex reactive distillation columns. *Energy* 36(11): 6289-6297, 2011.

Cowell, S.J. Environmental life cycle assessment of agricultural systems: integration into decision-making. Ph.D. dissertation, Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, Guildford, 1998.

Cruz, C. Análisis y monitoreo financiero de unidades autónomas empresariales dentro de la cadena productiva de la palma de aceite. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Economía y Administración. Bucaramanga, 2010.

Cuevas-Reyes, P. 2010. Importancia de la resiliencia biológica como posible indicador del estado de conservación de los ecosistemas: implicaciones en los planes de manejo y conservación de la biodiversidad. *Biológicas* 12(1): 1 – 7, 2010.

Da Costa, R.E. The energy balance in the production of palm oil biodiesel – Two case studies: Brazil and Colombia. *Cenipalma*: 1-5. 2005.

Damiano, A., Gatto, G., Marongiu, I. Decision support system for biomass energy exploitation in smart grid planning. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion - SPEEDAM, Pisa*; Junio de 2010. Artículo número 5542256, 1183-1188.

De Benedetto, L., Klemes, J. The environmental performance strategy map: an integrated approach to support the strategic decision-making process. *Journal of Cleaner Production* 17: 900-906, 2009.

Demirbas, Ayhan. Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy Conversion and Management* 1: 1-6, 2007.

Dussan, K.J., Cardona, C.A., Giraldo, O.H., Gutiérrez, L.F., Pérez, V.H. Analysis of a reactive extraction process for biodiesel production using a lipase immobilized on magnetic nanostructures. *Bioresource Technology* 101(24): 9542-9549, 2010.

EMPA, Universidad Pontificia Bolivariana, Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales de Colombia. *Estrategias de energía sostenible y biocombustibles para Colombia*. 2012.

Esguínados, M., Soria, A., Kavalov, B., Jensen, P. Techno-economic analysis of biodiesel production in the EU: a short summary for decision-makers. *Institute for Prospective Technological Studies, European Commission Joint Research Center, Report EUR 20279 EN*, 2002.

Esteves, A.M., Vanclay, F. Social development needs analysis as a tool for SIA to guide corporate-community investment: Applications in the minerals industry. *Environmental Impact Assessment review* 19(2): 137-145, 2009.

Fangrui, M., Milford, H. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology* 70: 1-15, 1999.

Fazio, S., Monti, A. Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. *Biomass and Bioenergy* 35 4868-4878, 2011.

Font de Mora, E., Torres, C., Valero, A. Assessment of biodiesel energy sustainability using the Exergy return on investment concept. *Energy* 45: 474-480. 2012.

Franks, D.M., Cohen, T. Social Licence Design: Constructive technology assessment within a mineral research and development institution. *Technological Forecasting & Social Change* doi:10.1016/j.techfore.2012.03.001, 2012.

Fullerton, D., Stavins, R. How Economists See the Environment. *Nature* 395: 433-434, 1998. Disponible en: http://works.bepress.com/don_fullerton/20. Consultado el 27 de Agosto de 2012.

Galafassi, S., Cucchetti, D., Pizza, F., Franzosi, G., Bianchi, D., Compagno, C. Lipid production for second generation biodiesel by the oleaginous yeast *Rhodotorula graminis*. *Bioresource Technology* 111: 398-403, 2012.

García, F. Calidad y seguridad alimentaria: ISO 22000 – Sistema para su gestión. Sección Agroalimentaria de ECA CERT, Bogotá, 2012.

Gao, J., Ji, T., Zhao, G. Drawing process design based on fuzzy knowledge reasoning. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence – AICI 2009, Shanghai; Noviembre de 2009. Volume 2, Article number 5376387 73-77. ISBN: 9780769538167.

Gassner, M., Maréchal, F. Combined mass and energy integration in process design at the example of membrane-based gas separation systems. Computers and Chemical Engineering 34: 2033–2042, 2010.

Giugliano, M., Cernuschi, S., Grosso, M., Rigamonti, L. Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. Waste Management 31: 2092-2101, 2011.

Gog, A., Roman, M., Tosa, M., Paizs, C., Irimie, F.D. Biodiesel production using enzymatic transesterification – Current state and perspectives. Renewable Energy 39: 10-16, 2012.

Gong, M., Wall, G. On exergetics, economics and optimization of technical processes to meet environmental conditions. International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems Beijing, China, June 10-13, 1997.

Gómez, M.P., Zurique, L. Análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera (Escenario1: Cultivo en Sabana de Torres, esterificación en medio ácido y con metanol). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2009.

Gomez-Castro, F.I., Rico-Ramirez, V., Segovia-Hernandez, J.G., Hernandez, S. Feasibility study of a thermally coupled reactive distillation process for biodiesel

production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49(3) 262-269, 2010.

González, E., Pedraza, J., Domínguez, E.R., Oquendo, H. Experiencia en la consideración de la incertidumbre en la industria azucarera y de procesos químicos de Cuba. *Centro Azúcar* 31(1): 92-94, 2004.

González, M., Vargas, R. "Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuerilla". Escenario: Cultivo en el eje cafetero por transesterificación en medio ácido y etanol. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2009.

Goodland, Robert y Ledoc. G., "Neoclassical Economics and Principles of Sustainable Development", *Ecological Modelling*, Vol. 38, 1987.

Guimaraes, R., Piamba, O., Fellows, C.E., Lameira, V., Goncalves, O.L., Aguilar, M.E., Santo, D.M. Sustainability and mitigation of greenhouse gases using ethyl beef tallow biodiesel in energy generation. *Journal of Cleaner Production* 29-30: 269-276, 2012.

Gunstone, F.D. *Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses*. 1st Edition. Canada: Blackwell Publishing Ltda, 61-62, 2002.

Haas, M.J., McAloon, A.J., Yee, W.C., Foglia, T.A. A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technologies* 97(4): 671-678, 2006.

Hajipour, S., Satyro, M.A. Uncertainty analysis applied to thermodynamic models and process design – 1. Pure components. *Fluid Phase Equilibria* 307: 78-94, 2011.

He, Y., Chang, W. Research on the computer integrated quality system for product design process. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation – ICICTA 2010, Changsha; Mayo de 2010. Volume 3, Article number 5523332: 148-151. ISBN: 9780769540771.

Heiskanen, 2002. The institutional logic of life cycle thinking. Journal of Cleaner Production 10: 427-437, 2002.

Hernández, A., Tanco, M., Kim, J-K. Simulation-based process design and integration for sustainable retrofit chemical processes. Industrial & Engineering Chemistry Research 50: 12067-12079, 2011.

Hernández, T., Beltrán, C. Factibilidad para la creación de una planta extractora de aceite de palma en el municipio de Sabana de Torres – Santander. Universidad Industrial de Santander, Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia, Gestión Empresarial. Bucaramanga, 2010.

Hepbasli, A., Utlu, Z., Akdeniz, R. Energetic and exergetic aspect of cotton stalk production in establishing energy policies. Energy Policy 35(5): 3015-3024, 2007.

Himmelblau, D.M., Bischoff, K.B. Análisis y simulación de procesos. Editorial Reverté, 2004.

Hingu, S.M., Gogate, P.R., Rathod, V.K. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. Ultrasonic Sonochemistry 17: 827-832, 2010.

Hoefnagels, R., Smeets, E., Faaij, A. Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 1661-1694, 2010.

<http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/09.09.015>, 2009. Consultada el: 15 de Junio de 2012.

<http://www.ebb-eu.org/biodiesel.php>. Consultada el: 15 de Junio de 2012.

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/6/55868-6.pdf&ei=oULjT77uCIT28gTHI-iGCA&usg=AFQjCNGZYD_544two9jutpGj-B1EaFRO_g Consultada el: 15 de Junio de 2012.

http://ec.europa.eu/environment/emas/index_en.htm ; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:114:0001:0029:ES:PDF>
Consultada el: 15 de Junio de 2012.

<http://www.minagricultura.gov.co/02componentes/05biocombustible.aspx>
Consultada el: 15 de Junio de 2012.

<http://www.ebb-eu.org/stats.php> Consultada el: 15 de Junio de 2012.

<http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-271.htm> Consultada el: 15 de Junio de 2012.

<http://www.scribd.com/doc/86572628/199/Caso-base> Consultada el: 15 de Junio de 2012.

ISO 14040. Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Principios y Marco de Referencia. Versión oficial en español de la norma Europea. International Organisation for Standardisation ISO. Internacional standard. Madrid, 2006.

ISO 14044. Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Requisitos y Directrices. Versión oficial en español de la norma Europea. International Organisation for Standardisation ISO. Internacional standard. Madrid, 2006.

Jaimes, W., Acevedo, P., Kafarov, V. Exergy analysis of palm oil biodiesel production. Chemical Engineering Transactions 21: 1345-1350, 2010.

Jaimes, W., Acevedo, P., Kafarov, V. Comparison of technology alternative for palm oil biodiesel production using exergy analysis. Computer Aided Chemical Engineering 30: 207-211. 2012.

Jaimes, W., Merlano, D. Aplicación de la metodología análisis de ciclo de vida de la cuna a la cuna al biodiesel producido a partir de aceite de palma africana en Sabana de Torres. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2009.

Johnson, E. Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right. Environ Impact asses Rev doi:10.1016/j.eiar.2008.11.002, 2008.

Khandoker, H., et al. IECF – an approach for integrated environmental and cost evaluation of process design alternatives and its application to evaluate different NO_x prevention technologies in a 125 MW thermal power plant. Energy for Sustainable Development 15: 61-68, 2011.

Kian Fei, Y., Kok Tat, T., Ahmad, A., Keat Teong, L. Life cycle assessment of palm biodiesel: revealing facts and benefits for sustainability. Applied Energy 86: 189-196, 2009.

Ko, M.J., Park, H.J., Hong, S.Y. Continuous biodiesel production using in situ glycerol separation by membrane reactor system. *Bioprocess Byosystems Eng* 35: 69-75, 2012.

Kodera, K. Analysis of allocation methods of bioethanol LCA. Faculty of Earth and Life Science, MSc in Environmental Resource and Management. 2007. citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.126

Koers, K., Kalnes, T.N., Shonnar, D.R. Life cycle analysis of alternatives for diesel: an assessment of inputs, study assumptions and feedstock type. *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings – AIChE 100, Philadelphia; Noviembre de 2008*. ISBN: 9780816910502.

Knothe, G., Van, J.G., Krahl, J. *The biodiesel handbook*. Illinois: AOCS Press, 2005.

Kumar, B., Rajesh, P. Esterification of free fatty acids using sulfated zirconia. *World Renewable Energy Congress*. P. 239-242, 2008.

Kumarappan, S., Joshi, S. Trading greenhouse gas emission benefits from biofuel use in US transportation: Challenges and opportunities. *Biomass and Bioenergy* 35: 4511-4518, 2011.

Kuzayakov, Y., Domanski, G. Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of plant nutrition and soil science* 163(4): 421-431. 2000.

Lee, I., Carleer, B.D., Haage, S. High fidelity springback simulation and compensation with robust forming process design. 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Seoul; Agosto de 2011. *Conference Proceedings*. ISBN: 9780735409491.

Limburg, K.E., O'Neill, R.V., Costanza, R., Farber, S. Special Issue: The dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives. Complex systems and valuation. *Ecological Economics* 41: 409-420, 2002.

López, D., Goodwin, J.R., James, J., Bruce, D., Furuta, S. Esterification and transesterification using modified zirconia catalysts. *Applied Catalysis* 339: 76-83, 2008.

Ma, F., Hanna, M. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 70: 1-15, 1999.

MacGovern, J.A., O'Toole, F. Virtual-systems concept for exergy analysis of flow network plant. Part II. Exergetic and exergoeconomic analysis illustration. *International Symposium on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation - ECOS 92*, Zaragoza; Junio de 1992. 161-166, ISBN: 0791806316.

Man Kee, L., Keat Teong, L., Abdul Rahman, M. Life Cycle assessment for the production of biodiesel: A case study in Malaysia for palm oil versus jatropha oil. *Biofuels, bioproducts & biorefining* 3: 601-612, 2009.

Martínez, D., Acevedo, P., Kafarov, V. Life cycle assessment for joint Production of biodiesel and bioethanol from African palm. *Chemical Engineering Transactions* 21: 1314-1320, 2010.

Marulanda, V.F. Biodiesel production by supercritical methanol transesterification: process simulation and potential environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production* 33: 109-116. 2012.

Matos, S., Silvestre, B.S. Managing stakeholder relations when developing sustainable business models: The case of the Brazilian energy sector. *Journal of Cleaner Production* doi: 10.1016/j.jclepro.2012.04.023, 2012.

Meher, L.C., Sagar, D., Naik, S.N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10: 248-268, 2006.

Mekhemer, G. Surface characterization of zirconia, holmium oxide/zirconia and sulfated zirconia catalysts. *Colloids and Surfaces Physicochemical Eng Aspects* 274: 211-218, 2006.

Melado, A. Modelo de cultivo de palma aceitera en Honduras. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Madrid, 2008.

Ministerio del Medio Ambiente – Colombia; Metodología General para la Presentación de Estudios de Impacto Ambiental; Bogotá, 2010.

Morais, S., Martins, A.A., Mata, T.M. Comparison of allocation approaches in soybean biodiesel life cycle assessment. *Journal of the Energy Institute* 83: 48-55, 2010.

Morais, S., Couto, S., Martins, A.A., Mata, T.M. Designing eco-efficient biodiesel production processes from waste vegetable oils. *Computer Aided Chemical Engineering* 28: 253-258, 2010.

Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B. *Fundamentals of Engineering thermodynamics*. 7th Edition. Von Hoffman Press Inc. ISBN: 9780470495902, 2010.

Nanaki, E., Koroneos, C. Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. *Journal of Cleaner Production* 20: 14-19, 2012.

Nguyen, T.T.H., van der Werf, H.M.G., Eugene, M., Veysset, P., Devun, J., Chesneau, G., Doreau, M. Effects of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livestock Science* 145(1-3): 239-251, 2012.

Núñez, L.E., et al. Valoración económica y ambiental del cultivo de palma de aceite. Universidad Cooperativa de Colombia, Centro de Investigaciones. Bucaramanga, 2007.

Owolarafe, O.K., Faborode, M.O., Ajibola, O.O. Comparative evaluation of the digester – screw press and hand – operated hydraulic press for palm fruit processing. *Journal of Food Engineering* 52(3): 249-255, 2002.

Palacios-Bereche, R., Ensinas, A., Nebra, S.A. Energy consumption in ethanol production by enzymatic hydrolysis – The integration with conventional process using pinch analysis. *Chemical Engineering Transactions* 24: 1189-1194, 2011.

Papadokonstantakis, S., Siddharta, A., Sugiyama, H., Hungerbuler, K. Uncertainty patterns and sensitivity analysis of an indicator based on process design framework. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18, Lyon; Junio de 2008. ISBN: 9780444532275, 145-150.

Pauli, G. Zero Emissions Research and Initiatives. www.zeri.org. Consultada el: 17 de Julio de 2012.

Perry, R.H., Chilton, C.H. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 5th edition. McGraw-Hill. 1973.

Perry, R.H., Green, D.W. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6th, 7th and 8th edition. McGraw-Hill. 1984, 1997 y 2008.

Persson, U.M. Conserve or convert? Pan-tropical modeling of REDD-bioenergy competition. *Biological Conservation* 146: 81-88, 2012.

Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E. Plant design and economics for chemical engineers. 5th Edition. Mc Graw Hill, 2002.

Pimentel, D., Havey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267: 1117–1123, 1995.

Plentz, S., et al. Obtencao de biodiesel a partir do oleo de mamona: estudo comparativo, entre diferentes catalisadores, na reacao de transesterificacao empregandose metanol e etanol. Congresso Brasileiro de Mamona: Energia e Sustentabilidade. Campina Grade, 2004.

Queiroz, A.G., Franca, L., Ponte, M.X. The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dende”) in the Amazon. *Biomass and Bioenergy* 36: 50-59, 2012.

Quesada-Medina, J., Olivares-Carrillo, P. Evidence of thermal decomposition of fatty acid methyl esters during the synthesis of biodiesel with supercritical methanol. *The Journal of Supercritical Fluids* 56: 56-63, 2011.

Reijnders, L., Huijbregts, M.A.J. Biogenic greenhouse gas emissions linked to the life cycles of biodiesel derived from European rapeseed and Brazilian soybeans. *Journal of Cleaner Productions* 16(18): 1943-1948, 2008.

Rivero, R., Rendón, C., Monroy, L. The Exergy of crude oil mixtures and petroleum fractions: Calculation and application. *International Journal of Applied Thermodynamics* 2: 115-123, 1999.

Rockstrom, J., et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2):32, 2009.

Romeo, L.M., Catalina, D., Lisbona, P., Lara, Y., Martínez, A. Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO₂ capture systems. *Greenhouse Gases: Science and Technology* 1(1): 72-82, 2011.

Rudd, D.F., Watson, C.C. *Strategy of Process Engineering*. First edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.

Saaty, T.L. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International Book Co., New York. ISBN: 0070543712, 1980.

Saka, S., Minami, E. A novel non-catalytic biodiesel production process by supercritical methanol as NEDO (High Efficiency Bioenergy Conversion Project). 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment – SEE 2006, Bangkok, 2006.

Salvi, B.L., Panwar, N.L. Biodiesel resources and production technologies – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6): 3680-3689, 2012.

Salazar, S. Valoración económica de espacios naturales: un fenómeno reciente. Disponible en: <http://www.ces.gva.es/pdf/conferencias/02/1.pdf>. Consultado el 20-04-2011. Consultada el: 15 de Junio de 2012.

Santana, G.C.S., Martins, P.F., de Lima da Silva, N., Batistella, C.B., Maciel Filho, R., Wolf Maciel, M.R. Simulation and cost estimate for biodiesel production using castor oil. *Chemical Engineering research and design* doi:10.1016/j.cherd.20

Santander, C. Simulación de una planta de producción y purificación de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial HYSYS PLANT 3.2. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2007.

Santori, G., Di Nicola, G., Moglie, M., Polonara, F. A review analyzing the industrial biodiesel production practice starting from vegetable oil refining. *Applied Energy* 92: 109-132, 2012.

Santos da Silva, P.R., Goncalves, F. An integrated methodology for environmental impacts and costs evaluation in industrial processes. *Journal of Cleaner Production* 17: 1339-1350, 2009.

SathyaSelvabala, V., Selvaraj, D.K., Kalimuthu, J., Perivaraman, P.M., Subramanian, S. Two step biodiesel production from calophyllum inophyllum oil: Optimization of modified β -zeolite catalyzed pre-treatment. *Bioresource technology* 102: 1066-1073, 2011.

Sciubba, E., Wall, G. A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004. *Int. J. of Thermodynamics* 10: 1-26, 2007.

Sendzikiene, E., Makareviciene, V., Janulis, P., Kitrys, S. Kinetics of free fatty acids esterification with methanol in the production of biodiesel fuel. *European Journal of Lipid Science and Technology* 106(12): 831-836, 2004.

Sheenan, J., et al. Life cycle Inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 1998.

Sierra, C., Casas, M. Análisis exergético de una planta de producción de biodiesel de aceite de palma. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2011.

Sit, C. et al. Kinetic study on transesterification of palm oil. *Journal of Oil Palm Research* 16(2): 19-29, 2004.

Sorin, M., Lambert, J., Paris, J. Exergy flows analysis in chemical reactors. *Trans IChemE Part A*: 389-395, 1998.

Sotoft, L.F., Ron, B-G., Christensen, K.V., Norddahl, B. Process simulation and economical evaluation of enzymatic biodiesel production plant. *Bioresource Technology* 101(14): 5266-5274, 2010.

Suwannakarn, K., Lotero, E., Goodwin, J. Stability of sulfated zirconia and the nature of the catalytically active species in the transesterification of triglycerides. *Journal of Catalysis* 255: 279-286, 2008.

Szargut, J., Styrylska, T. Approximate evaluation of the exergy of fuels. *Brennst. Warme Kraft* 16(12): 589–596 (In German), 1964.

Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*; Hemisphere Publishing Corporation: New York, 1988.

Talens Peiró, L., Lombardi, L., Villalba Méndez, G., Gabarrell, D. Life cycle assessment and exergetic life cycle assessment of the production of biodiesel from used cooking oil. *Energy* 35(2): 889-893. 2010.

Tao, L., Humbird, D., Aden, A., Tan E.C.D. Sensitivity and uncertainty analysis of updated corn stover to ethanol process design and economic models. AIChE Annual Meeting – 10AIChE, Salt Lake City; Noviembre de 2010. Conference Proceedings. ISBN: 9780816910656.

Tan, K.T., Gui, M.M., Lee, K.T., Mohamed, A.R. An optimized study of methanol and ethanol in supercritical technology for biodiesel production. *The Journal of Supercritical Fluids* 53: 82-87, 2010.

Tingley, D.D., Davison, B. Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. *Building and Environment* 57: 387-395. 2012.

Tolbert, V.R., Todd, D.E., Mann, L.K., Jawdy, C.M., Mays, D.A., Malik, R., Bandaranayake, W., Houston, A., Tyler, D., Pettry, D.E. Changes in soil quality and below-ground carbon storage with conversion of traditional agricultural crop lands to bioenergy crop production. *Environmental Pollution* 116: 97-106, 2002.

UNEP – SETAC. Guidelines for Social Life Assessment of Products. Catherine Benoît, UQAM/CIRAIG, and Bernard Mazijn, Ghent University, Quebec. 2009.

Universidad de Chile. Actualización de factores de emisión para buses y transporte de carga de la región metropolitana. Santiago de Chile: Fundación para la transferencia tecnológica. 2007.

Uribe, G. A. Análisis teórico-práctico del proceso de extracción de aceite crudo de palma en la planta de beneficio de Palmas del Cesar S.A., ubicada en el corregimiento de minas, sur del Cesar. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 2011.

Verdugo, C., Luna, D., Posadillo, A., Sancho, E.D., Rodríguez, S., Bautista, F., Luque, R., Marinas, J.M., Romero, A.A. Production of a new second generation biodiesel with a low cost lipase derived from *Thermomyces lanuginosus*: Optimization by response surface methodology. *Catalysis Today* 167: 107-112, 2011.

Wardenaar, T., van Ruijven, T., Beltran, A.M., Vad, K., Guinee, J., Heijungs, R. Differences between LCA for analysis and LCA for policy: A case study on the consequences of allocation choices in bioenergy policies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 1: 1-9, 2012.

Wechsung, A., Oldenburg, J., Yu, J., Polt, A. Supporting chemical process design under uncertainty. 10th International Symposium on Process System Engineering – PSE2009, Salvador (Brasil); Agosto de 2009. ISBN: 9780444534729, 939-944.

Wei, H. Computer-aided design and scale-up of crystallization processes: Integrating approaches and case studies. *Chemical Engineering Research and Design* 88: 1377-1380, 2010.

Wei-Jia, T., Chun-Ming, H., Giridhar, N., Qen-Teng, W. An enzymatic/acid-catalyzed hybrid process for biodiesel production from soy bean oil. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers* 39(3): 203-210, 2008.

Willoughby, N. Perspective scaling up by thinking small: a perspective on the use of scale-down techniques in process design. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 81: 1849-1851, 2006.

Wohlmuth, M. Forming simulations as a competitive and innovative factor: virtual process design in massive forming. *Konstruktion* 1-2: 1-10, 2011.

Xu, Y., Nordblad, M., Woodley, J.M. A two-stage enzymatic ethanol-based biodiesel production in a packed bed reactor. *Journal of biotechnology*. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2012.05.017, 2012.

Yang, L., Hu, Sh., Chen, D., Zhang, D. Exergy analysis on eco-industrial systems. *Science in China: Series B Chemistry* 49(3): 281-288, 2006.

Young, D., Scharp, R., Cabezas, H. The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics. *Waste Management* 20(8): 605-615. 2000.

Zapata, C.D., Martínez, I.D., Arenas, E., Henao, C.A. Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: Diseño y simulación de dos procesos continuos. *Dyna* 74(151): 71-82, 2007.

Zhang, Y., Dubé, M.A., McLean, D.D., Kates, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2 economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technologies* 90: 229-240, 2003.

Zhong, P., Song, J., Liu, M., Li, M., Ding, S. Design history knowledge management system based on product development process management and its implementation. *International Conference on Computer, Informatics, Cybernetics and Applications – CICA 2011, Hangzhou; Septiembre de 2011. Volume 107: 1375-1383. ISBN: 9789400718388.*

ANEXOS

Anexo A EJERCICIO BIBLIOMÉTRICO CON SCOPUS

Sciverse Scopus analyze results values - Source Title

Your query : (TITLE-ABS-KEY-AUTH("life cycle assessment" AND "process design"))

Number of results : 117

SOURCE TITLE,

International Journal of Life Cycle Assessment,"19"

Computer Aided Chemical Engineering,"6"

Computers and Chemical Engineering,"6"

Environmental Science and Technology,"4"

Green Chemistry,"4"

Journal of Cleaner Production,"4"

Journal of Industrial Ecology,"3"

Chemical Engineering and Technology,"2"

Chemical Engineering Transactions,"2"

Environmental Progress,"2"

Science of the Total Environment,"2"

11aiche 2011 Aiche Annual Meeting Conference Proceedings,"1"

Aiche Journal,"1"

American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2009,"1"

Aiche Annual Meeting Conference Proceedings,"1"

Appita Journal,"1"

Brazilian Journal of Chemical Engineering,"1"

Business Process Management Journal,"1"

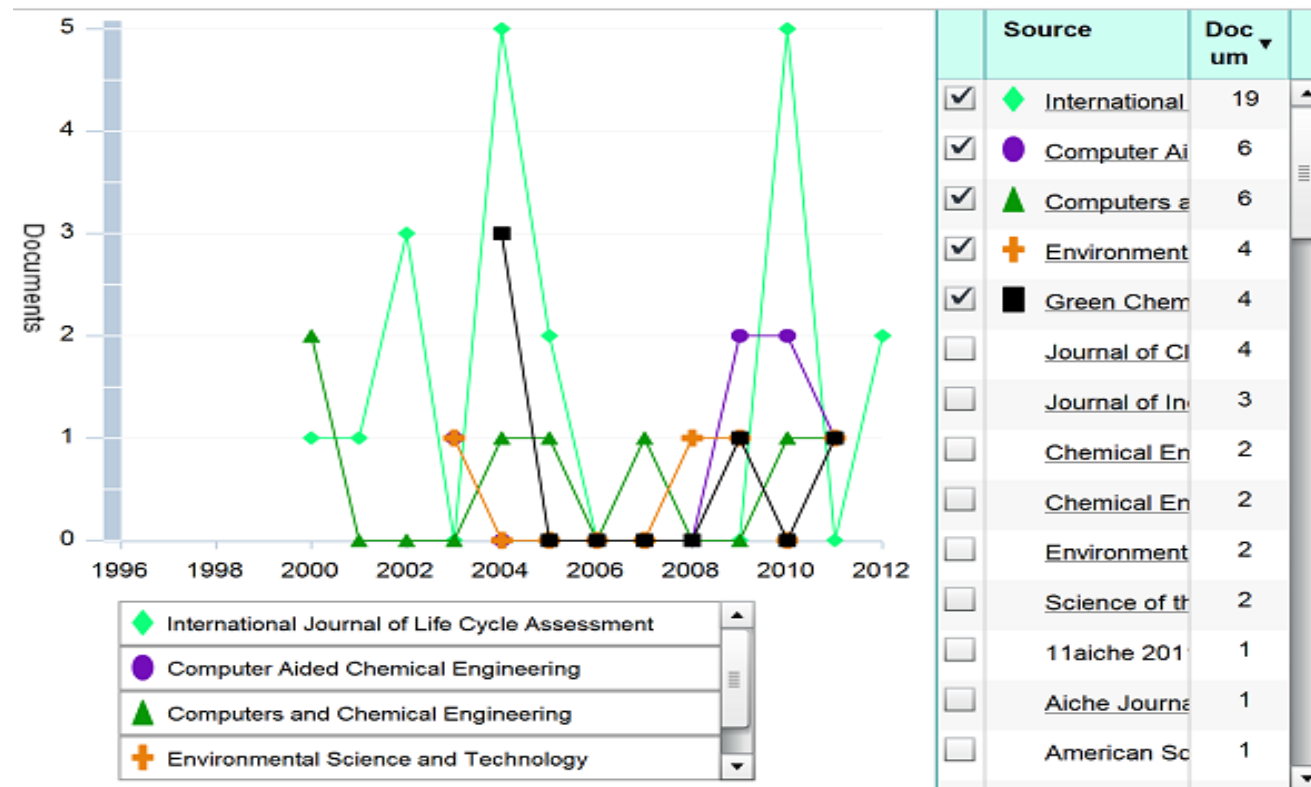
Chemical Engineering Research and Design,"1"
Chemical Engineering Science,"1"
American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Division Publication DE,"1"
Chinese Journal of Chemical Engineering,"1"
Clean Technologies and Environmental Policy,"1"
Desalination,"1"
Design and Manufacture for Sustainable Development 2004,"1"
Energy,"1"
Energy for Sustainable Development,"1"
Environmental Modelling and Software,"1"
Industrial and Engineering Chemistry Research,"1"
Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development,"1"
Institution of Chemical Engineers Symposium Series,"1"
Integrated Environmental Assessment and Management,"1"
International Journal of Chemical Reactor Engineering,"1"
International Journal of Engineering Education,"1"
International Journal of Innovative Computing Information and Control,"1"
AAPS Pharmscitech,"1"
International Journal of Production Research,"1"
International Journal of Thermodynamics,"1"
Journal of Chemical Engineering of Japan,"1"
Journal of Chemical Technology and Biotechnology,"1"
ACS Symposium Series,"1"
Journal of Environmental Management,"1"
ASEE Annual Conference and Exposition Conference Proceedings,"1"
Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management,"1"

Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,"1"

Key Engineering Materials,"1"
Minerals and Energy Raw Materials Report,"1"
National Electronic Packaging and Production Conference Proceedings of the Technical Program West and East,"1"
Nippon Kinzoku Gakkaishi Journal of the Japan Institute of Metals,"1"
Proceeding 2009 IEEE 10th International Conference on Computer Aided Industrial Design and Conceptual Design E Business Creative Design Manufacturing Caid and Cd 2009,"1"
Proceedings 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing Isam 2011,"1"
Proceedings 3rd International Conference on Developments in Esystems Engineering Dese 2010,"1"
Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis Cmd 2008,"1"
Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering,"1"
Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology Issst 2011,"1"
Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering Tmce 2010,"1"
Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference Msec2008,"1"
Process Safety and Environmental Protection,"1"
Process Safety and Environmental Protection Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B,"1"
Resources Conservation and Recycling,"1"
SAE 2011 World Congress and Exhibition,"1"

Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering,"1"
TMS Annual Meeting,"1"
Tappi Journal,"1"

Waste Management and Research,"1"
 Water Environment Research,"1"
 Water Science and Technology Water Supply,"1"
 World Academy of Science Engineering and Technology,"1"



Sciverse Scopus analyze results values - Source Title

Your query : (TITLE-ABS-KEY("cradle to cradle" AND "life cycle assessment"))

Number of results : 15

SOURCE TITLE,

International Journal of Life Cycle Assessment,"4"

2000 Annual Conference Abstracts Canadian Society for Civil Engineering,"1"

Aaai Spring Symposium Technical Report,"1"

Applied Mechanics and Materials,"1"

Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing Proceedings of the 18th CIRP

International Conference on Life Cycle Engineering,"1"

International Journal of Sustainable Engineering,"1"

International Journal of Sustainable Society,"1"

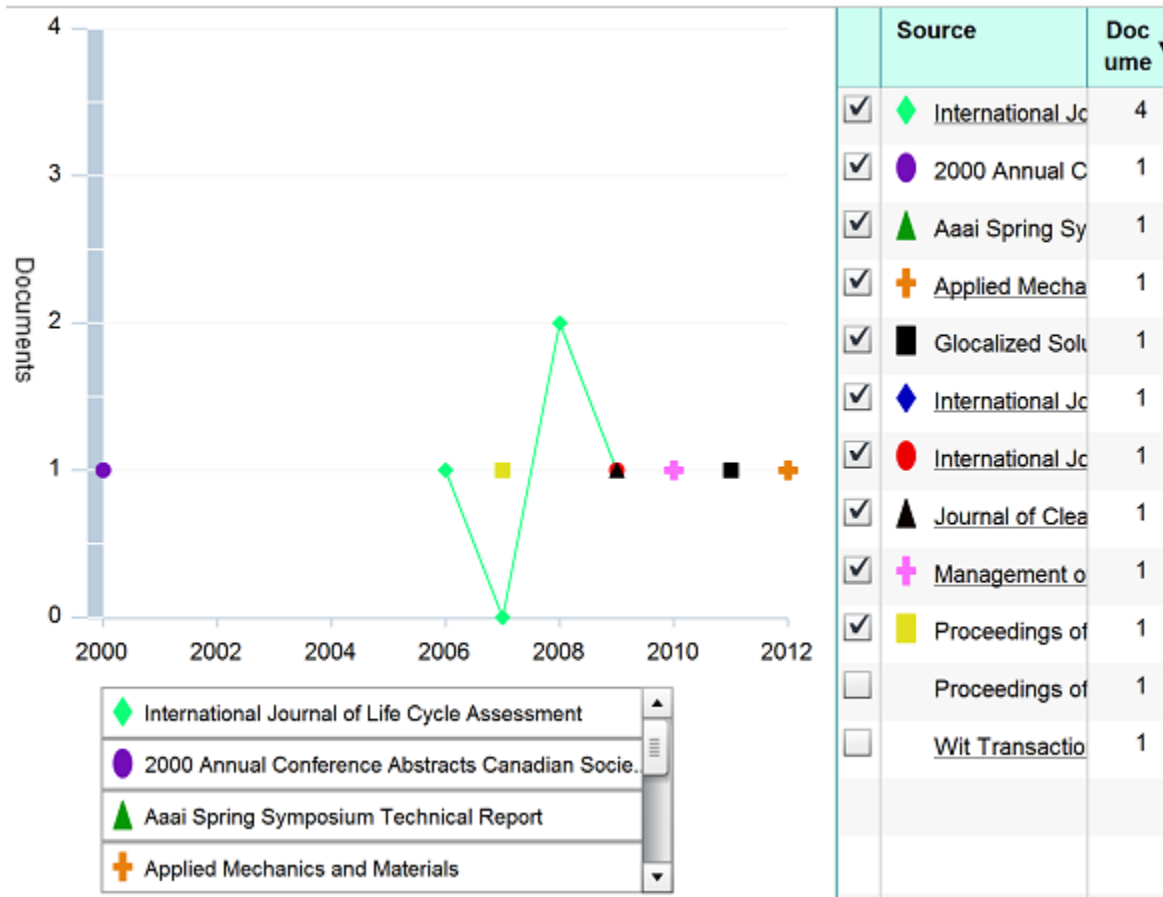
Journal of Cleaner Production,"1"

Management of Environmental Quality,"1"

Proceedings of the 2006 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium Sieds
06,"1"

Proceedings of the ASME Interpack Conference 2009 Ipack2009,"1"

Wit Transactions on Ecology and the Environment,"1"



Anexo B EVALUACIONES ECONÓMICAS CASOS 2 Y 3

CASO DE ESTUDIO 2

INFLACIÓN **0,04**

Factor ajuste costos **0,1**

Depreciación lineal del
0,1 hasta valor sto. Igual al
50% de f fija 13.602.604.851

Impuestos al patrimonio **0,03**
Impuestos a las utilidades **0,35**

TAM **0,12**

Año	INGRESOS (Saño)	C Mat. Primas (Saño)	C Serv. Ind. (Saño)	C Mano Obra (Saño)	C Mant. (Saño)	TOTAL COSTOS	U.R.A.I	Depreciación	Depreciación acum.	V.L. Inv. fija	V.L. patrimonio	Impuestos patrimonio	U.L.A.I.	Imp. Utilid.	Total imp.	U.R.D.I.	P/F	V.P. U.R.D.I.	Sum. V.P. U.R.D.I.	V.P. V. sto.	V.P.N.
2012	225.727.585.458	176.681.106.978	170.598.998.858	1.693.176.117	280.688.672	388.059.967.361	-162.332.381.903	2.720.520.970	2.720.520.970	24.484.688.733	24.484.688.733	734.540.662	-165.052.902.873	0	734.540.662	-163.066.922.565	0,892857143	-145.595.466.576	-145.595.466.576	14.146.709.046	-163.458.061.804
2013	234.756.688.876	183.748.351.258	177.422.958.813	1.760.903.162	291.916.218	403.582.366.056	-168.825.677.179	2.720.520.970	5.441.041.941	21.764.167.762	21.764.167.762	652.925.033	-171.546.198.150	0	652.925.033	-169.478.602.212	0,797193878	-135.107.304.059	-280.702.770.635	14.712.577.407	-297.999.497.502
2014	244.146.956.431	191.098.285.308	184.519.877.165	1.831.339.288	303.592.867	419.725.660.698	-175.578.704.266	2.720.520.970	8.161.562.911	19.043.646.792	19.043.646.792	571.309.404	-178.299.225.237	0	571.309.404	-176.150.013.670	0,711780248	-125.380.100.382	-406.082.871.018	15.301.080.504	-422.791.094.788
2015	253.912.834.689	198.742.216.720	191.900.672.252	1.904.592.859	315.736.582	436.514.687.126	-182.601.852.437	2.720.520.970	10.882.083.881	16.323.125.822	16.323.125.822	489.693.775	-185.322.373.407	0	489.693.775	-183.091.546.212	0,635518078	-116.357.987.621	-522.440.858.639	15.913.123.724	-538.537.039.188
2016	264.069.348.076	206.691.905.389	199.576.699.142	1.980.776.574	328.366.045	453.975.274.611	-189.905.926.535	2.720.520.970	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-192.626.447.505	0	408.078.146	-190.314.004.680	0,567426856	-107.989.277.275	-630.490.135.913	16.549.648.673	-645.889.791.514
2017	274.632.121.999	214.959.581.605	207.559.767.107	2.060.007.637	341.500.687	472.134.285.595	-197.502.163.596	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-197.502.163.596	0	408.078.146	-197.910.241.741	0,506631121	-100.267.487.666	-730.697.623.579	17.211.634.620	-745.495.293.233
2018	285.617.406.879	223.557.964.869	215.862.157.792	2.142.407.942	355.160.714	491.019.657.019	-205.402.250.140	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-205.402.250.140	0	408.078.146	-205.810.328.285	0,452349215	-93.098.140.508	-823.795.764.087	17.900.100.004	-837.904.968.356
2019	297.042.103.154	232.500.283.463	224.496.644.103	2.228.104.260	369.367.143	510.660.443.300	-213.618.340.145	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-213.618.340.145	0	408.078.146	-214.026.418.291	0,403883228	-86.441.680.692	-910.237.444.780	18.616.104.005	-923.630.645.049
2020	308.923.787.281	241.800.294.802	233.476.509.868	2.317.228.490	384.141.829	531.086.861.032	-222.163.073.751	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-222.163.073.751	0	408.078.146	-222.571.151.897	0,360610025	-80.261.388.646	-990.498.833.425	19.360.748.165	-1.003.147.389.534
2021	321.280.738.772	251.472.306.594	242.815.570.262	2.409.917.568	399.507.502	552.330.335.473	-231.049.596.701	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-231.049.596.701	0	408.078.146	-231.457.674.847	0,321973237	-74.523.176.704	-1.065.022.010.129	20.135.178.091	-1.076.896.136.312
2022	334.131.968.323	261.531.198.858	252.528.193.073	2.506.314.270	415.487.802	574.423.548.892	-240.291.580.569	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-240.291.580.569	0	408.078.146	-240.699.658.715	0,287476104	-69.195.400.145	-1.134.217.410.275	20.940.585.215	-1.145.286.129.333
2023	347.497.247.056	271.922.446.812	262.629.320.796	2.606.566.841	432.107.314	597.400.490.848	-249.903.243.792	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-249.903.243.792	0	408.078.146	-250.311.321.938	0,256675093	-64.248.681.824	-1.198.466.092.098	21.778.208.624	-1.208.697.187.748
2024	361.397.136.938	282.872.144.685	273.134.493.627	2.710.829.515	449.391.607	621.295.510.481	-259.899.373.544	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-259.899.373.544	0	408.078.146	-260.307.451.689	0,22917419	-59.655.749.426	-1.258.121.841.524	22.649.336.969	-1.267.481.808.829
2025	375.853.022.415	294.187.030.472	284.059.873.373	2.819.262.695	467.367.271	646.148.370.901	-270.295.348.485	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-270.295.348.485	0	408.078.146	-270.703.426.631	0,204619813	-55.391.284.432	-1.313.513.125.956	23.555.310.447	-1.321.967.119.782
2026	390.887.143.312	305.954.511.691	295.422.268.307	2.932.033.203	486.061.962	671.994.305.737	-281.107.162.425	0	13.602.604.851	13.602.604.851	13.602.604.851	408.078.146	-281.107.162.425	0	408.078.146	-281.515.240.570	0,182696261	-51.431.781.941	-1.364.944.907.897	24.497.522.865	-1.372.456.689.305

Año	Verif
2012	24.484.688.733
2013	21.764.167.762
2014	19.043.646.792
2015	16.323.125.822
2016	13.602.604.851

CASO DE ESTUDIO 3

INFLACIÓN 0,04

Factor ajuste costos 0,1

Depreciación lineal del
0,1 hasta valor sto. Igual al
50% de fija 11.982.158.318

Impuestos al patrimonio 0,03
Impuestos a las utilidades 0,35

TAM 0,12

Año	INGRESOS (Saño)	C Mat. Primas (Saño)	C Serv. Ind. (Saño)	C Mano Obra (Saño)	C Mant. (Saño)	TOTAL COSTOS	U.R.A.I	Depreciación	Depreciación acum.	V.L Inv. fija	V.L. patrimonio	Impuestos patrimonio	U.L.A.I.	Imp. Utilid.	Total imp.	U.R.D.I.	P/F	V.P. U.R.D.I.	Sum. V.P. U.R.D.I.	V.P. V. sto.	V.P.N.
2012	237.802.940.122	283.396.950.927	17.500.680.494	1.693.176.117	247.250.886	336.486.731.582	-98.683.791.460	2.396.431.664	2.396.431.664	21.567.884.972	21.567.884.972	647.036.549	-101.080.223.124	0	647.036.549	-99.330.828.009	0,892857143	-88.688.239.294	-88.688.239.294	12.461.444.650	-104.422.905.288
2013	247.315.057.726	294.732.828.964	18.200.707.714	1.760.903.162	257.140.921	349.946.200.845	-102.631.143.119	2.396.431.664	4.792.863.327	19.171.453.308	19.171.453.308	575.143.599	-105.027.574.782	0	575.143.599	-103.206.286.718	0,797193878	-82.275.419.896	-170.963.659.190	12.959.902.436	-186.199.867.398
2014	257.207.660.035	306.522.142.122	18.928.736.023	1.831.339.288	267.426.558	363.944.048.879	-106.736.388.843	2.396.431.664	7.189.294.991	16.775.021.645	16.775.021.645	503.250.649	-109.132.820.507	0	503.250.649	-107.239.639.493	0,711780248	-76.331.057.173	-247.294.716.364	13.478.298.534	-262.012.528.474
2015	267.495.966.437	318.783.027.807	19.685.885.463	1.904.592.859	278.123.621	378.501.810.834	-111.005.844.397	2.396.431.664	9.585.726.654	14.378.589.981	14.378.589.981	431.357.699	-113.402.276.060	0	431.357.699	-111.437.202.096	0,635518078	-70.820.356.539	-318.115.072.903	14.017.430.475	-332.293.753.072
2016	278.195.805.094	331.534.348.919	20.473.320.882	1.980.776.574	289.248.565	393.641.883.267	-115.446.078.173	2.396.431.664	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-117.842.509.836	0	359.464.750	-115.805.542.922	0,567426856	-65.711.175.095	-383.826.247.998	14.578.127.694	-397.444.230.948
2017	289.323.637.298	344.795.722.876	21.292.253.717	2.060.007.637	300.818.508	409.387.558.598	-120.063.921.300	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-120.063.921.300	0	359.464.750	-120.423.386.049	0,506631121	-61.010.235.090	-444.836.483.088	15.161.252.802	-457.871.340.930
2018	300.896.582.790	358.587.551.791	22.143.943.866	2.142.407.942	312.851.248	425.763.060.942	-124.866.478.152	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-124.866.478.152	0	359.464.750	-125.225.942.901	0,452349215	-56.645.857.011	-501.482.340.099	15.767.702.914	-513.910.747.829
2019	312.932.446.102	372.931.053.863	23.029.701.621	2.228.104.260	325.365.298	442.793.583.379	-129.861.137.278	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-129.861.137.278	0	359.464.750	-130.220.602.027	0,403883228	-52.593.917.096	-554.076.257.195	16.398.411.030	-565.873.956.809
2020	325.449.743.946	387.848.296.017	23.950.889.685	2.317.228.430	338.379.910	460.505.326.715	-135.055.582.769	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-135.055.582.769	0	359.464.750	-135.415.047.518	0,360610025	-48.832.023.669	-602.908.280.864	17.054.347.472	-614.050.044.036
2021	338.467.733.704	403.362.227.858	24.908.925.273	2.409.917.568	351.915.107	478.925.539.783	-140.457.806.080	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-140.457.806.080	0	359.464.750	-140.817.270.829	0,321973237	-45.339.392.457	-648.247.673.321	17.736.521.371	-658.707.262.594
2022	352.006.443.052	419.496.716.972	25.905.282.284	2.506.314.270	365.991.711	498.082.561.375	-146.076.118.323	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-146.076.118.323	0	359.464.750	-146.435.583.072	0,287476104	-42.096.730.923	-690.344.404.244	18.445.982.225	-700.094.532.663
2023	366.086.700.774	436.276.585.651	26.941.493.575	2.606.566.841	380.631.379	518.005.863.830	-151.919.163.056	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-151.919.163.056	0	359.464.750	-152.278.627.805	0,256675093	-39.086.130.946	-729.430.535.189	19.183.821.514	-738.442.824.319
2024	380.730.168.805	453.727.649.077	28.019.153.318	2.710.829.515	395.856.634	538.726.098.383	-157.995.929.578	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-157.995.929.578	0	359.464.750	-158.355.394.328	0,22917419	-36.290.969.248	-765.721.504.437	19.951.174.375	-773.966.440.706
2025	395.959.375.557	471.876.755.040	29.139.919.451	2.819.262.695	411.690.900	560.275.142.318	-164.315.766.761	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-164.315.766.761	0	359.464.750	-164.675.231.511	0,204619813	-33.695.815.014	-799.417.319.451	20.749.221.350	-806.864.208.745
2026	411.797.750.579	490.751.825.242	30.305.516.229	2.932.033.203	428.158.536	582.686.148.011	-170.888.397.432	0	11.982.158.318	11.982.158.318	11.982.158.318	359.464.750	-170.888.397.432	0	359.464.750	-171.247.862.181	0,182696261	-31.286.344.170	-830.703.663.621	21.579.190.204	-837.320.584.061

Año	Verif
2012	21.567.884.972
2013	19.171.453.308
2014	16.775.021.645
2015	14.378.589.981
2016	11.982.158.318

Anexo C FACTORES DE CARACTERIZACIÓN

A continuación se enumeran los factores de caracterización que fueron usados en la etapa de evaluación de impacto de la metodología ACV. Para la categoría cambio climático se usó:

Tabla A1. Factores de caracterización GWP para cambio climático en kg CO₂ eq. /kg

Sustancia	GWP ₅₀₀
Dioxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	7
Óxido de Nitrógeno (N ₂ O)	156
Monóxido de Carbono (CO)	1,57

Fuente: IPCC, 2001

Para la categoría acidificación:

Tabla A2. Factores de caracterización AP para acidificación en g H⁺ eq. /g

Sustancia	AP
Ácido clorhidrico (HCl)	2,74E-02
Ácido fluorhidrico (HF)	5,00E-02
Amoniaco (NH ₃)	5,90E-02
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2,20E-02
Óxidos de azufre (SO ₂)	3,12E-02

Fuente: TEAM, 1999

Para la categoría de eutrofización:

Tabla A3. Factores de caracterización EP para eutrofización en g PO₄ eq. /g

Sustancia	EP
Nitratos (NO ₃ ⁻)	9,50E-02
Nitrógeno	4,20E-01
Amonio (NH ₄)	4,20E-01
Amoniaco (NH ₃)	3,50E-01
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1,30E-01
Demanda Química de Oxígeno (DCO)	2,20E-02
Óxido Nitroso (N ₂ O)	2,70E-01

Fuente: TEAM, 1999

Para la categoría formación de oxidantes fotoquímicos:

Tabla A4. Factores de caracterización POCP para categoría formación de oxidantes fotoquímicos en g etileno eq. /g

Sustancia	POCP bajo
Benceno	1,10E-01
Formaldehidos	2,20E-01
Hidrocarburos (sin especificar)	1,94E-01
Hidrocarburos	1,95E-01
Metano	0,00E+00

Fuente: TEAM, 1999

Para la categoría efectos respiratorios:

Tabla A5. Factores de caracterización RE para categoría efectos respiratorios en kg PM2,5 eq. /kg

Sustancia	RE
Monóxido de Carbono (CO)	0,001,04E-03
Óxidos de azufre (SO ₂)	7,8E-02
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1,27E-01
Amonio (NH ₄)	1,21E-01
Partículas (sin especificar)	1,57E-01
Óxido Nitroso (N ₂ O)	1,96E-01
PM10	5,36E-01

Fuente: TEAM, 1999

Para la categoría energía no renovable:

Tabla A6. Factores de caracterización RE para categoría energía no renovable en MJ energía primaria /kg

Sustancia	RE
Crude Oil	4,58E+01
Gas Natural	4,03E+01

Fuente: TEAM, 1999

EMISIONES DE LA COMBUSTIÓN DEL DIESEL

Las emisiones producidas por la combustión del diesel varían dependiendo del tipo de medio de transporte en el cual se estén originando. Así, en la tabla A7 se reportan las emisiones generadas en un camión de carga pesada.

Tabla A7. Emisiones de combustión del diesel para un camión de carga pesada.

Contaminante	Emisión (g/MJ quemado)
Hidrocarburos	8,5E-02
CO	3,2E-01
NO _x	8,9E-01
PM10	4,1E-02
SO ₂	1,2E-01
CH ₄	4,2E-02
N ₂ O	1,9E-03
CO ₂	75,5

Fuente: Universidad de Chile 2007.

Anexo D EVALUACIONES AMBIENTALES CON GWP₁₀₀

A continuación se enumeran los factores de caracterización GWP₁₀₀ que fueron usados para la categoría de cambio climático en la etapa de evaluación de impacto de la metodología ACV en este anexo:

Tabla A4.1. Factores de caracterización GWP₁₀₀ para cambio climático en kg CO₂ eq. /kg

Sustancia	GWP ₅₀₀
Dioxido de Carbono (CO ₂)	1,000E+00
Óxido de Nitrógeno (N ₂ O)	2,960E+02
Monóxido de Carbono (CO)	1,570E+00

Fuente: IPCC, 2001.

Usando estos factores de caracterización los resultados obtenidos son muy similares a los encontrados cuando se usa GWP₅₀₀, tan similares que no afectan de ninguna forma las conclusiones que se presentan en el trabajo. A continuación se presentan las tablas y las figuras con los resultados obtenidos:

Tabla A4.2. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel a partir de aceite de palma con metanol y NaOH como catalizador. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	CO ₂	1,47E+07
	CH ₄	1,21E+06
	N ₂ O	6,24E+04
	Total	1,60E+07
Acidificación (kg-eq. H⁺)	SO ₂	6,88E+03
	NO ₂	9,12E+02
	HCl	2,70E+01
	HF	5,88E+00
	NH ₃	3,65E-04
	Total	7,83E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,38E-01
	Nitrógeno (N ₂)	0,00E+00
	Amonia (como N)	1,72E+01
	Amoníaco (NH ₃)	2,17E-03
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,39E+03
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	3,78E+01

	Óxido Nitroso (N ₂ O)	5,74E+01
	Total	5,50E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	3,49E-02
	Formaldehidos	2,64E+00
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,77E+02
	Hidrocarburos	3,81E+02
	Metano (CH ₄)	0,00E+00
	Total	9,61E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	1,04E+01
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,72E+04
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,28E+03
	Amonio (NH ₄)	4,96E+00
	Partículas (sin especificar)	3,98E+03
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	4,16E+01
	PM10	8,67E+02
	Total	2,74E+04
Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	6,32E+07
	Gas Natural	8,70E+01
	Total	6,32E+07

Fuente: La Autora.

Tabla A4.3. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de palma con etanol y sulfato de zirconio como catalizador. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	CO ₂	2,61E+08
	CH ₄	1,43E+07
	N ₂ O	1,27E+06
	Total	2,76E+08
Acidificación (kg-eq. H⁺)	SO ₂	6,88E+03
	NO ₂	9,12E+02
	HCl	2,70E+01
	HF	5,88E+00
	NH ₃	3,65E-04

	Total	7,83E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,38E-01
	Nitrógeno (N ₂)	0,00E+00
	Amonia (como N)	1,72E+01
	Amoníaco (NH ₃)	2,17E-03
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,39E+03
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	3,78E+01
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	5,74E+01
	Total	5,50E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	3,49E-02
	Formaldehidos	2,64E+00
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,77E+02
	Hidrocarburos	3,81E+02
	Metano (CH ₄)	0,00E+00
	Total	9,61E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	1,04E+01
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,72E+04
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,28E+03
	Amonio (NH ₄)	4,96E+00
	Partículas (sin especificar)	3,98E+03
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	4,16E+01
	PM10	8,67E+02
	Total	2,74E+04
Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	6,32E+07
	Gas Natural	8,70E+01
	Total	6,32E+07

Fuente: La Autora.

Tabla A4.4. Evaluación de impacto ACV “puerta a puerta”. Biodiesel de aceite de higuera con metanol y NaOH como catalizador. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	CO ₂	1,30E+07
	CH ₄	1,07E+06
	N ₂ O	5,52E+04
	Total	1,42E+07
Acidificación (kg-eq. H⁺)	SO ₂	6,88E+03
	NO ₂	9,12E+02
	HCl	2,70E+01
	HF	5,88E+00
	NH ₃	3,65E-04
	Total	7,83E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,38E-01
	Nitrógeno (N ₂)	0,00E+00
	Amonia (como N)	1,72E+01
	Amoníaco (NH ₃)	2,17E-03
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,39E+03
	Demanda Química de Oxígeno (DCO)	3,78E+01
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	5,74E+01
	Total	5,50E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	Benceno	3,49E-02
	Formaldehidos	2,64E+00
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,77E+02
	Hidrocarburos	3,81E+02
	Metano (CH ₄)	0,00E+00
	Total	9,61E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	Monóxido de Carbono (CO)	1,04E+01
	Óxidos de azufre (SO ₂)	1,72E+04

	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5,28E+03
	Amonio (NH ₄)	4,96E+00
	Partículas (sin especificar)	3,98E+03
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	4,16E+01
	PM10	8,67E+02
	Total	2,74E+04
Energía no renovable (MJ energía primaria)	Crude Oil	6,32E+07
	Gas Natural	8,70E+01
	Total	6,32E+07

Fuente: La Autora.

Tabla A4.5. Evaluación de impacto con ACV “puerta a puerta” de la extracción de aceite crudo de palma. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	9,65E+06
Acidificación (kg-eq. H+)	2,566E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	3,074E+03
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	4,735E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	9,309E+03
Energía no renovable (MJ energía primaria)	2,561E+08

Fuente: La Autora.

Tabla A4.6. Evaluación de impacto del cultivo de palma en el Magdalena Medio. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Cambio climático (kg-eq. CO₂)	9,89E+06
Acidificación (kg-eq. H+)	2,132E+03
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	1,100E+04
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	8,585E+02
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	8,765E+03
Energía no renovable (MJ energía primaria)	1,345E+08

Fuente: La Autora.

Tabla A4.7. Evaluación de impacto etapa de uso y distribución de biodiesel de palma obtenido con catálisis homogénea básica en mezclas: B10, B20 Y B100. Usando GWP_{100} para evaluar cambio climático.

CATEGORÍA DE IMPACTO	B100	B20	B10
Cambio climático (kg-eq. CO₂)	2,46E+08	1,47E+09	2,98E+09
Acidificación (kg-eq. H⁺)	6,81E+04	4,54E+05	9,36E+05
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	4,01E+05	2,16E+06	4,36E+06
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	8,91E+04	5,57E+05	1,14E+06
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	6,21E+05	3,52E+06	7,15E+06
Energía no renovable (MJ energía primaria)	2,25E+08	7,92E+10	1,78E+11

Fuente: La Autora.

Tabla A4.8. Resultados de la evaluación ambiental de los escenarios con metodología “cuna a cuna”. Usando GWP_{100} para evaluar cambio climático.

	PAST – B10	BOSQ - B10	PAST – B20	BOSQ - B20	PAST – B100	BOSQ - B100
Cambio climático (kg-eq. CO₂)	1,62E+09	2,14E+09	1,06E+08	6,32E+08	-1,12E+09	-5,92E+08
Acidificación (kg-eq. H⁺)	9,513E+05	9,513E+05	4,689E+05	4,689E+05	8,294E+04	8,294E+04
Eutrofización (kg-eq. PO₄)	4,304E+06	4,343E+06	2,106E+06	2,145E+06	3,483E+05	3,871E+05
Formación oxidantes fotoquímicos (kg-eq. Etileno)	1,144E+06	1,144E+06	5,592E+05	5,592E+05	9,135E+04	9,135E+04
Efectos respiratorios (kg-eq. PM_{2,5})	7,204E+06	7,204E+06	3,579E+06	3,579E+06	6,797E+05	6,797E+05

Fuente: La Autora.

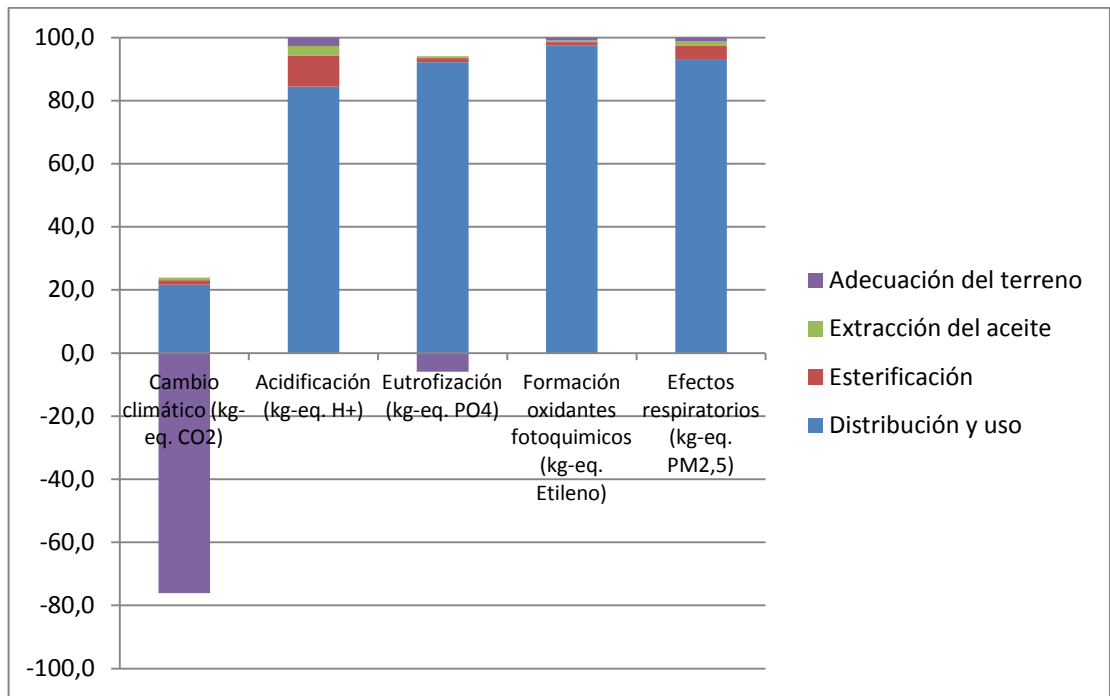


Figura A4.1. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.

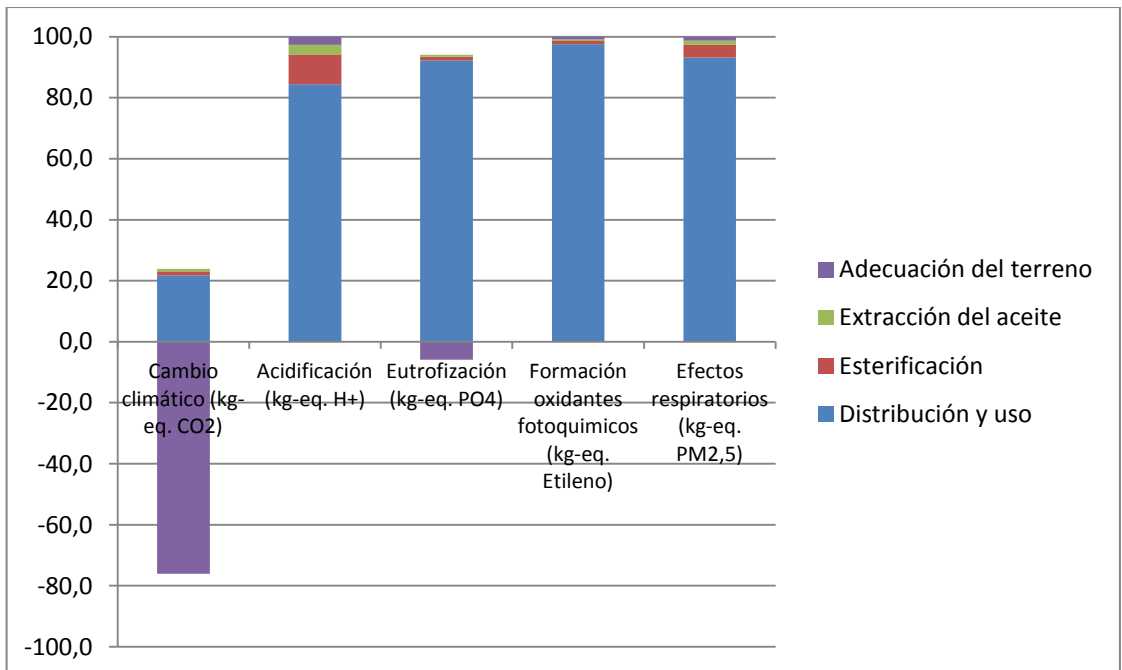


Figura A4.2. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-10. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.

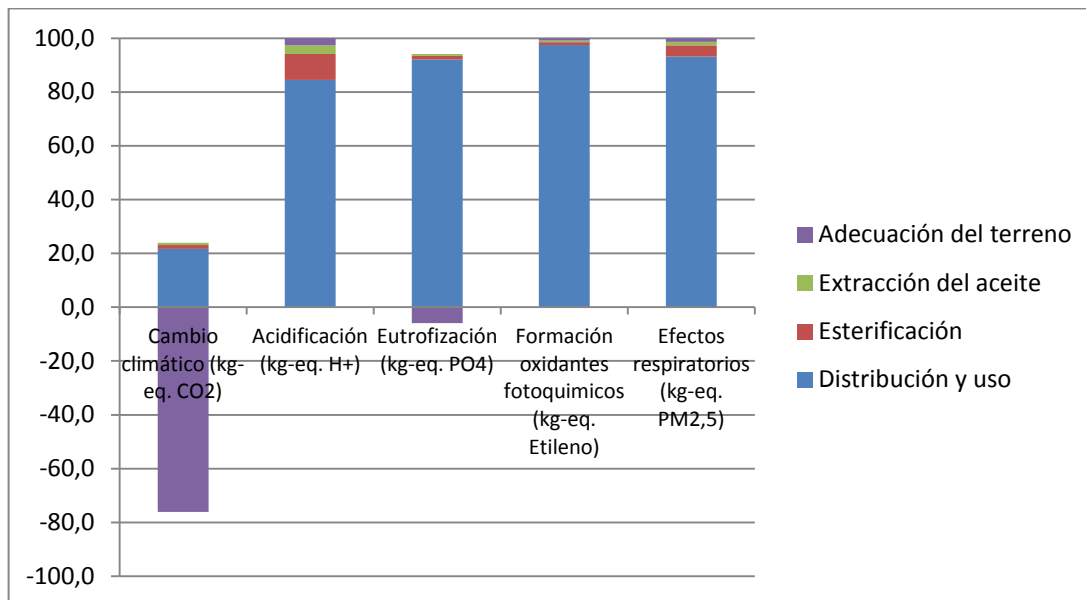


Figura A4.3. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.

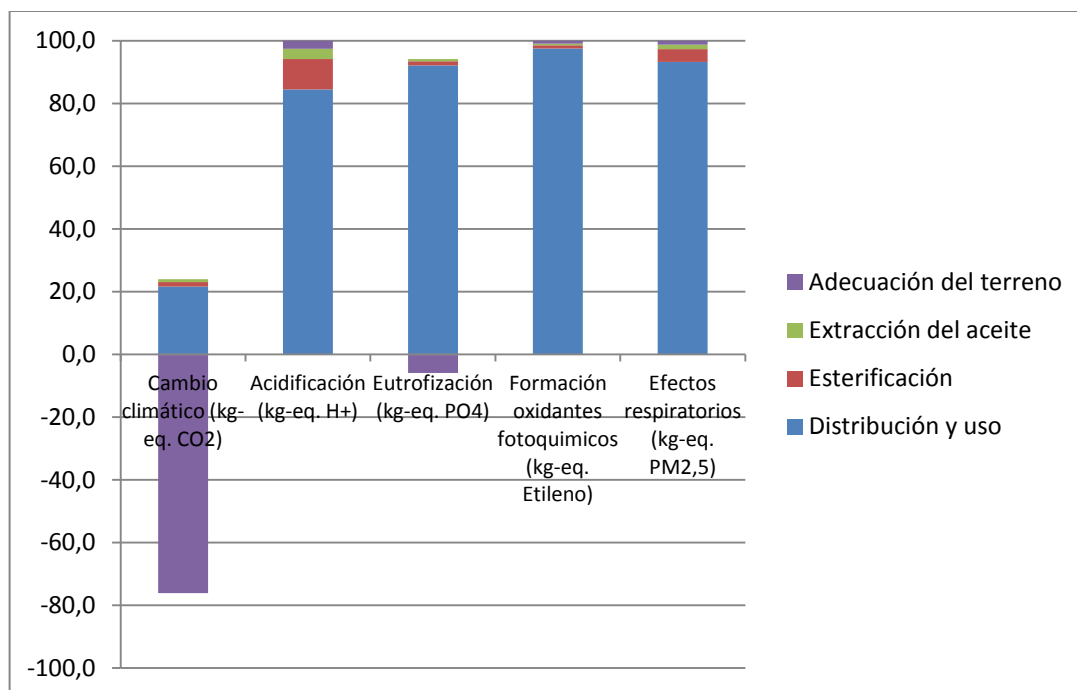


Figura A4.4. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-20. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.

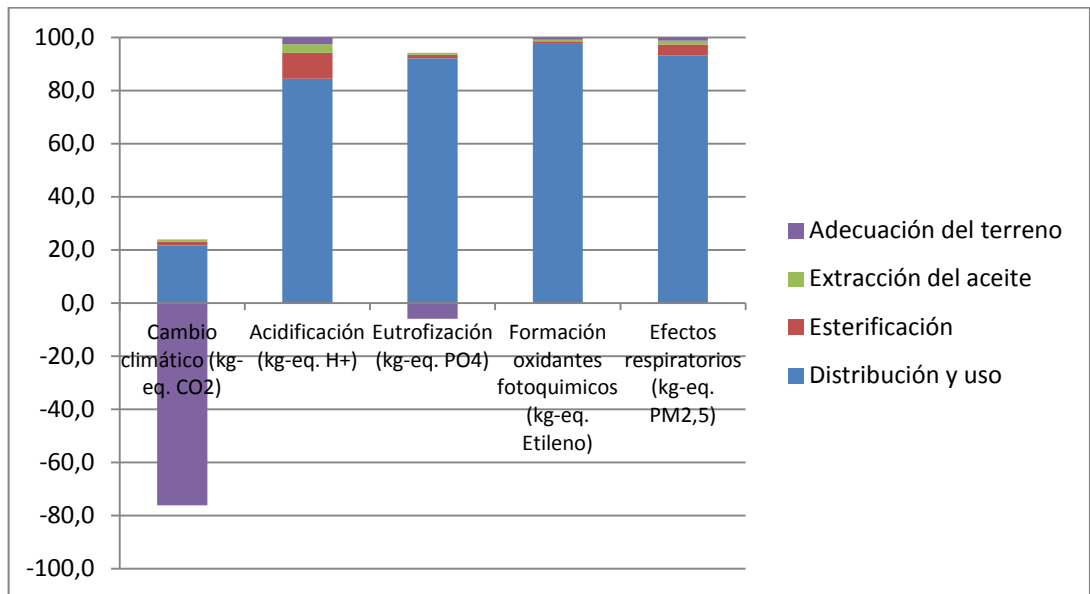


Figura A4.5. Perfil medio ambiental del escenario que parte de pastizales y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.

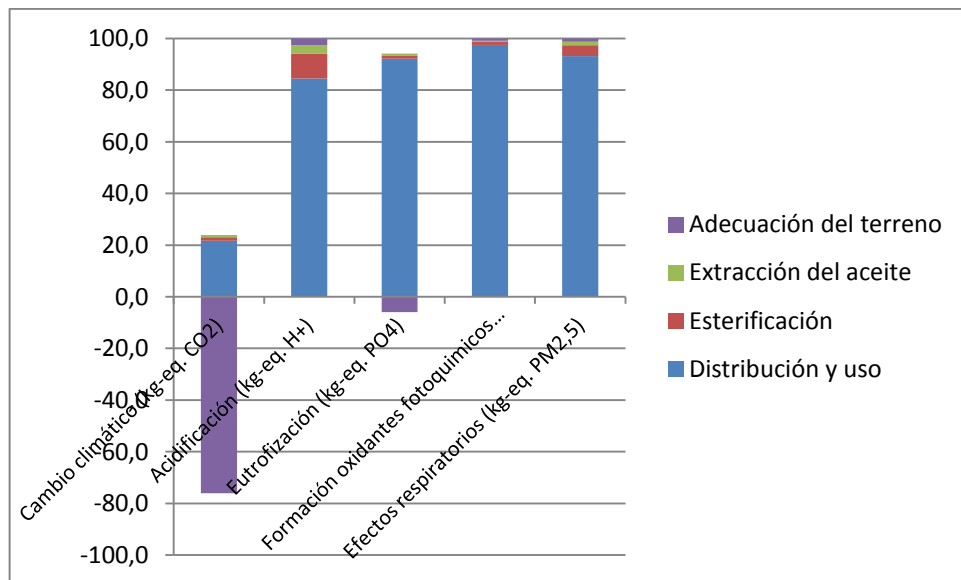


Figura A4.6. Perfil medio ambiental del escenario que parte de bosque terciario y que usa y distribuye el biodiesel en mezclas B-100. Usando GWP₁₀₀ para evaluar cambio climático.

Fuente: La Autora.