



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“OPTIMIZACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN
EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA CADENA
DE SUMINISTRO DEL AZÚCAR DE CAÑA”.

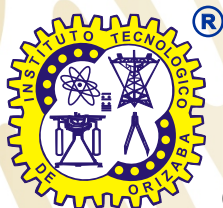
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

M.I.I. Ramiro Meza Palacios

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

JUNIO 2019



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 25/06/2019
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. RAMIRO MEZA PALACIOS
CANDIDATO A GRADO DE DOCTOR EN:
CIENCIAS DE LA INGENIERIA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"OPTIMIZACION DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN EL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL AZUCAR DE CAÑA".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

DR. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 13/06/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. DR. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

RAMIRO MEZA PALACIOS

la cual lleva el título de:

"OPTIMIZACION DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN EL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL AZUCAR DE CAÑA".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

SECRETARIO : DR. JOSE OCTAVIO RICO CONTRERAS

PRIMER VOCAL : DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

SEGUNDO VOCAL : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

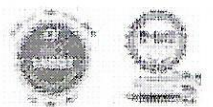
TERCER VOCAL : DR. EDUARDO ROLDAN REYES

VOCAL SUP. : DR. RUBEN POSADA GOMEZ

FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA

EGRESADO(A) DEL DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

OPCION: I Tesis



Índice

Resumen	5
Capítulo I. Generalidades	7
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Hipótesis.....	12
1.4 Objetivos	12
1.5 Justificación.....	13
1.6 Conclusiones	15
Capítulo II. Marco Teórico.....	16
2.1 Análisis de ciclo de vida (ACV)	17
2.1.1 Definición de objetivo y alcances.....	18
2.1.2 Análisis del inventario de ciclo de vida	18
2.1.3 Evaluación de impactos	18
2.1.4 Interpretación del ciclo de vida.....	20
2.2 Industria azucarera	21
2.2.1 Agricultura de la caña de azúcar.....	22
2.2.2 Transporte de caña de azúcar.....	22
2.2.3 Manufactura de azúcar de caña.....	23
2.2.3.1 Tratamiento del jugo.....	24
2.2.3.2 Ebullición, cristalización, separación centrifuga y secado de azúcar.....	24
2.2.4 Cogeneración de electricidad a partir de la caña de azúcar	24
2.3 Análisis de incertidumbre ambiental.....	25
2.3.1 Simulación Monte Carlo en el ACV	26
2.4 Inteligencia artificial	27
2.4.1 Algoritmos genéticos.....	28
2.4.2 Algoritmos genéticos multiobjetivo	30
2.4.3 TOPSIS.....	32
2.4.4 Sistemas expertos de apoyo a la decisión (SEAD).....	33
2.5 Conclusiones	37
Capítulo III. Estado del arte	38
3.1 Estado del arte del ACV en la industria azucarera.....	39
3.2 Estado del arte de la integración de técnicas de IA en el ACV.....	48
3.3 Conclusiones	55
Capítulo IV. Metodología de Investigación	57
4.1 Metodología propuesta.....	58
4.2 Etapa 1. Desarrollo del ACV en la producción de azúcar de caña.....	62
4.2.1 Estado del arte	63
4.2.2 Definición del objetivo y alcance del estudio	63
4.2.2.1 Objetivo	63
4.2.2.2 Alcance del estudio.....	64
4.2.2.3 La unidad funcional (UF).....	65
4.2.2.4 Límites del sistema	65
4.2.3 Inventario de ciclo de vida de la azúcar de caña.....	69

4.2.4	Evaluación de impactos en la producción de azúcar de caña.....	75
4.3	Etapa 2. Sistema experto de apoyo a la decisión para la fertilización NPK.....	77
4.3.1	Introducción.....	77
4.3.2	Estado del arte	78
4.3.3	Desarrollo del sistema experto de apoyo a la decisión en fertilización NPK	80
4.3.3.1	Variables del SEAD.....	80
4.3.3.2	Arquitectura de las variables del SEAD	82
4.3.3.3	Reglas de inferencia difusa	87
4.3.3.4	Pruebas.....	88
4.4	Etapa 3. Optimización de los impactos ambientales	90
4.4.1	Introducción.....	91
4.4.2	Estado del arte	91
4.4.3	La SMC como herramienta previa a la optimización multiobjetivo	91
4.4.3.1	Simulación Monte Carlo de la agricultura de caña	92
4.4.3.2	Simulación Monte Carlo del transporte de caña	102
4.4.3.3	Simulación Monte Carlo de la fábrica y la cogeneración de electricidad	105
4.4.3.4	Formulación del problema de optimización.....	113
4.5	Conclusiones.....	117
Capítulo V. Resultados.....		118
5.1	Resultados del ACV en la producción de azúcar de caña	119
5.1.1	Análisis de la contribución de las etapas	119
5.1.2	Análisis de emisiones ambientales.	120
5.1.3	Discusión y recomendaciones de los resultados obtenidos.....	123
5.2	Resultados del SEAD.....	129
5.2.1	Análisis con la metodología de superficie de respuesta.....	131
5.3	Resultados de la optimización multiobjetivo	134
5.3.1	Selección de soluciones factibles con el método TOPSIS	137
5.3.2	Análisis de escenario de la mejor solución factible de TOPSIS	139
5.3.3	Discusión y recomendación de los resultados de la optimización multiobjetivo.....	144
5.4	Conclusiones	147
5.4.2	Conclusiones del ACV	147
5.4.3	Conclusiones del SEAD	148
5.4.4	Conclusiones de la optimización multiobjetivo.....	149
Conclusiones y perspectivas.....		151
Referencias		158
Anexo		172
Acrónimos		174
Glosario de términos		176

Figuras

Figura 2.1 Fases y aplicación de un ACV (basado en ISO 14040, 1997).....	17
Figura 2.2 Marco general de la metodología IMPACT 2002+.....	20
Figura 2.3 Cadena de suministro del procesamiento de la caña de azúcar.....	22
Figura 2.4 Proceso para la evaluación de incertidumbre y variabilidad en el ICV.....	27
Figura 2.5 Operadores básicos de los AGs.....	30
Figura 2.6 Tipos de funciones de pertenencia.....	35
Figura 3.1 Límites del Sistema producto de la producción de caña y azúcar.....	39
Figura 4.1 Metodología propuesta del enfoque integrado con ACV y técnicas de IA.....	59
Figura 4.2 Metodología aplicada a las etapas del proyecto.....	62
Figura 4.3 Límites globales en el sistema producto industria azucarera.....	66
Figura 4.4 Límites iniciales del sistema agrícola en la industria azucarera.....	67
Figura 4.5 Límites iniciales de la manufactura de azúcar de caña en la industria azucarera.....	68
Figura 4.6 Diagrama operacional del SEAD.....	77
Figura 4.7 Fracción de pruebas de normalidad de las variables del modelo CED-M.....	83
Figura 4.8 Función de membresía e IC de la variable pH (CED-M).....	84
Figura 4.9 Metodología propuesta que integra, ACV, SMC y OMAG.....	90
Figura 4.10 Resultados obtenidos en la aplicación de fertilizantes.....	96
Figura 4.11 Gráfico de tornado de coeficientes de correlación en la aplicación de fertilizantes.....	97
Figura 4.12 Resultados y gráfico de coeficiente de correlación por el uso de los pesticidas.....	98
Figura 4.13 Resultados y gráfico de coeficientes de correlación por uso de herbicidas.....	100
Figura 4.14 Resultados y gráfico de coeficientes de correlación por el uso de diésel.....	102
Figura 4.15 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por diésel en transporte.....	105
Figura 4.16 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso de diésel en el transporte.....	109
Figura 4.17 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso cal en fábrica.....	110
Figura 4.18 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso bagazo.....	111
Figura 4.19 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso combustóleo.....	113
Figura 5.1 Contribución ambiental de las etapas.....	119
Figura 5.2 Contribución de los impactos de las etapas de análisis.....	122
Figura 5.3 Porcentaje de contribución ambiental de las categorías punto final.....	122
Figura 5.4 Porcentaje de contribución en las 4 categorías punto final.....	123
Figura 5.5 Contribución de la etapa de agricultura de caña de azúcar.....	127
Figura 5.6 Coeficiente de determinación de la condición edáfica del modelo CED-M.....	129
Figura 5.7 Coeficiente de determinación de la tasa de N (del modelo NPK-M).....	130
Figura 5.8 Coeficiente de determinación de la tasa de P (del modelo NPK-M).....	130
Figura 5.9 Coeficiente de determinación de la tasa de K (del modelo NPK-M).....	131
Figura 5.10 Análisis de superficie de respuesta de los modelos.....	132
Figura 5.11 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs calidad del ecosistema.....	135
Figura 5.12 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs cambio climático.....	135
Figura 5.13 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs recursos.....	136
Figura 5.14 Frentes de Pareto restantes.....	136
Figura 5.15 Solución factible de TOPSIS costo total vs salud humana vs calidad del ecosistema.....	138
Figura 5.16 Solución factible de TOPSIS costo total vs cambio climático vs salud humana.....	138
Figura 5.17 Solución factible de TOPSIS costo total vs salud humana vs recursos.....	138
Figura 5.18 Redistribución del origen de las emisiones de los impactos medios.....	140
Figura 5.19 Porcentaje de reducción de los impactos medios.....	141
Figura 5.20 Redistribución del origen de las emisiones de las categorías.....	142

Tablas

Tabla 3.1 ACV del cultivo hasta la disposición final como azúcar estándar.	40
Tabla 3.2 ACV del cultivo a la cosecha de la caña de azúcar.	42
Tabla 3.3 ACV en la administración del bagazo y la cogeneración de electricidad.	43
Tabla 3.4 ACV y la producción y uso de combustible etanol.	45
Tabla 3.5 ACV para productos y subproductos de la caña de azúcar.	46
Tabla 3.6 Optimización de impactos ambientales con AG.	49
Tabla 3.7 Tratamiento de la subjetividad en el ACV con LD.	51
Tabla 3.8 RNAs en la predicción de impactos ambientales y los datos del ICV.	53
Tabla 4.1 UF de los sistemas producto.	65
Tabla 4.2 Métodos utilizados para la recolección de datos del ICV.	69
Tabla 4.3 Porcentajes de contenido total de elementos químicos en los fertilizantes.	71
Tabla 4.4 Entradas en la agricultura de la caña de azúcar.	72
Tabla 4.5 Entradas y salidas totales en la producción de azúcar.	73
Tabla 4.6 Parámetros de las variables y estimación de los IC.	83
Tabla 4.7 Variables en el modelo CED-M.	85
Tabla 4.8 Variables en el modelo NPK-M.	86
Tabla 4.9 Fracción de pruebas llevadas a cabo con el modelo CED-M.	89
Tabla 4.10 Fracción de pruebas llevadas a cabo con el modelo NPK-M.	89
Tabla 4.11 Entradas en el modelo de SMC para la agricultura de caña.	93
Tabla 4.12 Salidas del modelo para la agricultura de caña.	94
Tabla 4.13 Entradas en el modelo de SMC para el transporte de caña.	103
Tabla 4.14 Salida en el modelo de SMC para el transporte de caña.	103
Tabla 4.15 Parámetros inciertos en la fábrica.	106
Tabla 4.16 Parámetros totales de salida en la fábrica.	106
Tabla 4.17 Entradas en el modelo de SMC para la fábrica y cogeneración.	107
Tabla 4.18 Salidas del modelo de SMC para la fábrica y cogeneración.	107
Tabla 4.19 Factores con mayor impacto en el estudio.	116
Tabla 4.20 Variables de decisión.	116
Tabla 5.1 Contribuciones relativas totales de las cuatro etapas.	121
Tabla 5.2 Fracción de soluciones factibles del problema.	137
Tabla 5.3 Comparación de los resultados del modelo actual vs modelo optimizado.	139
Tabla 5.4 Comparación de la categorías punto final (modelo actual vs optimizado).	142
Tabla 5.5 Comparación de costos entre el modelo actual vs modelo optimizado.	143
Tabla 6.1 Productividad de este trabajo de investigación.	156
Tabla 6.2 Estancias empresariales e institucionales.	157

Resumen

La alta demanda de azúcar de caña a nivel mundial ha provocado que la agroindustria azucarera se convierta en una de las más importantes a nivel mundial; la producción de este bien es sumamente elevada en países como Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán y México, entre otros países. Los niveles de producción tan altos, requieren grandes cantidades de recursos para obtener el producto final; sin embargo en muchas ocasiones esta alta demanda de recursos conlleva una gran huella ambiental. En México, la mayor cantidad de producción se concentra en el estado de Veracruz, que reúne el mayor número de ingenios en el país. El estado de Veracruz es rico en recursos, sin embargo, la agroindustria azucarera está provocando cambios profundos medioambientales que requieren atención urgente para reducir las cargas contaminantes. Hoy en día, la agroindustria azucarera necesita convertirse en una industria responsable con el medio ambiente. Es por lo anterior, que en este documento se describen propuestas de solución para los problemas ambientales que provoca la producción de azúcar estándar.

En este documento, se plantean diferentes metodologías para analizar y reducir el impacto ambiental que tiene la producción de azúcar estándar; el estudio, se realiza con la ayuda del Grupo Porres a través del Ingenio San Pedro y la empresa Excelencia Cañera. El desarrollo de las propuestas comienza con la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que permite evaluar el impacto ambiental de la cadena de suministro del azúcar de caña. Después de los resultados del ACV, se desarrolla un Sistema Experto de Apoyo a la Decisión (SEAD) que ayuda en la aplicación de agroquímicos en la etapa agrícola. Finalmente, se desarrolla un modelo con Simulación Monte Carlo (SMC) de toda la cadena de suministro, para evaluar la incertidumbre y encontrar a las variables de impacto por medio del análisis de sensibilidad; a partir de estos resultados, se crea un modelo matemático que minimiza los impactos ambientales a través de la Optimización Multiobjetivo con Algoritmos Genéticos (OMAG).

En los siguientes puntos, se describe brevemente el contenido de cada capítulo de este documento:

-
- Capítulo I Generalidades. En este capítulo, se describe la problemática relacionada con la contaminación ambiental producida por la cadena de suministro de la industria azucarera, asimismo se describen los objetivos, la hipótesis, y la justificación con el enfoque del método de solución propuesto en este trabajo (en el campo de la inteligencia artificial).
 - Capítulo II Marco Teórico. En este apartado se describen los conceptos técnicos-teóricos utilizados en este trabajo de investigación, incluyendo la descripción de las actividades de la industria azucarera, y de las herramientas técnicas (técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y software de ACV) utilizadas para el desarrollo y validación de los modelos; así también, se explican las razones por las cuales fueron utilizadas, y sus ventajas al aplicarlas.
 - Capítulo III Estado del arte. En esta sección se realiza la revisión de la literatura, que reúne información de artículos científicos en el área de conocimiento. La primera sección comprende artículos del ACV aplicado en toda la cadena de suministro de la industria azucarera. La segunda sección analiza la aplicación de técnicas de IA con un enfoque de integración al ACV.
 - Capítulo IV Metodología de investigación. El contenido de este capítulo describe la metodología, los procedimientos, análisis y la clasificación de las variables; los modelos descritos presentan una solución factible a los problemas relacionados a la producción de azúcar estándar. En este capítulo se estudia la evaluación de impactos ambientales con ACV, la estimación de tasas de fertilizantes con un SEAD y la optimización de los impactos ambientales con OMAG.
 - Capítulo V Resultados. Este apartado muestra los resultados de la evaluación de impacto ambiental, así como los resultados de los modelos planteados para la estimación de tasas de fertilizantes y los de la OMAG. También se discuten los porcentajes de error o defectos encontrados en los modelos. Asimismo, se lleva a cabo la discusión sobre si los resultados son convincentes y cumplen las expectativas de los interesados. A partir del capítulo V se incluyen una sección de conclusiones y perspectivas.
-

Capítulo I

Generalidades

Resumen

En este capítulo se estudia y analiza el problema de la contaminación ambiental generada por la cadena de suministro de la industria azucarera. Actualmente, esta industria es muy importante para el desarrollo del país, sin embargo, las deficiencias técnicas y tecnológicas de sus procesos han dejado una gran huella ambiental. A continuación se describe la problemática, los objetivos, la hipótesis, y la justificación con el enfoque del método de solución propuesto en este trabajo (en el campo de la Inteligencia Artificial).

1.1 Introducción

El azúcar ha sido uno de los componentes más importantes de la dieta humana, es producida en 121 países y aproximadamente el 70% es obtenida de la caña, una hierba muy alta con tallos grandes que se cultiva principalmente en los países tropicales, el 30% restante se produce a partir de la remolacha azucarera (A. M. Contreras, Rosa, Pérez, Van Langenhove, & Dewulf, 2009). La agroindustria azucarera es una actividad relevante para la economía mundial, según los recursos que absorbe en el proceso laboral y de comercialización por el valor de su producción y por el tipo de consumo que experimenta su producto final. La producción de la caña de azúcar durante el periodo 1993 - 2017 se ha mantenido a un crecimiento constantemente, sin embargo, a partir del año 2007 se ha presentado un incremento significativo en la producción de azúcar de caña a nivel mundial, lo anterior se observa en la Figura 1.1 con información de la FAOSTAT (FAOSTAT, 2018).

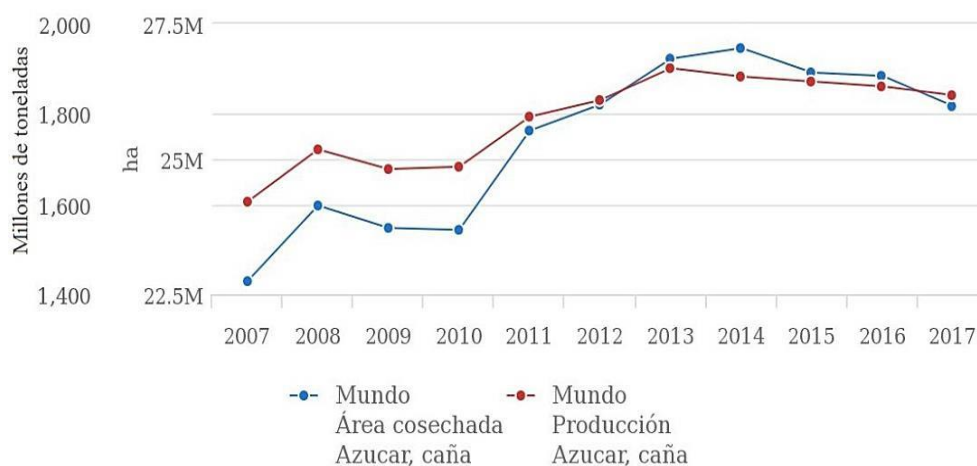


Figura 1.1 Producción de azúcar caña en el mundo, periodo 2007 a 2017.

Brasil a nivel mundial es el primer país productor de azúcar de caña, durante el periodo 2007 - 2017 ha tenido una producción promedio de 712,796,545.18 toneladas de azúcar de caña. La lista de 6 países con más producción la complementan países como India (335,877,230.55 ton), China (115,411,145.45 ton), Tailandia (87,164,445.91 ton), Pakistán (60,582,380.82 ton) y México (53,675,357.09 ton). Sus niveles de producción se observan en la Figura 1.2 (FAOSTAT, 2018).

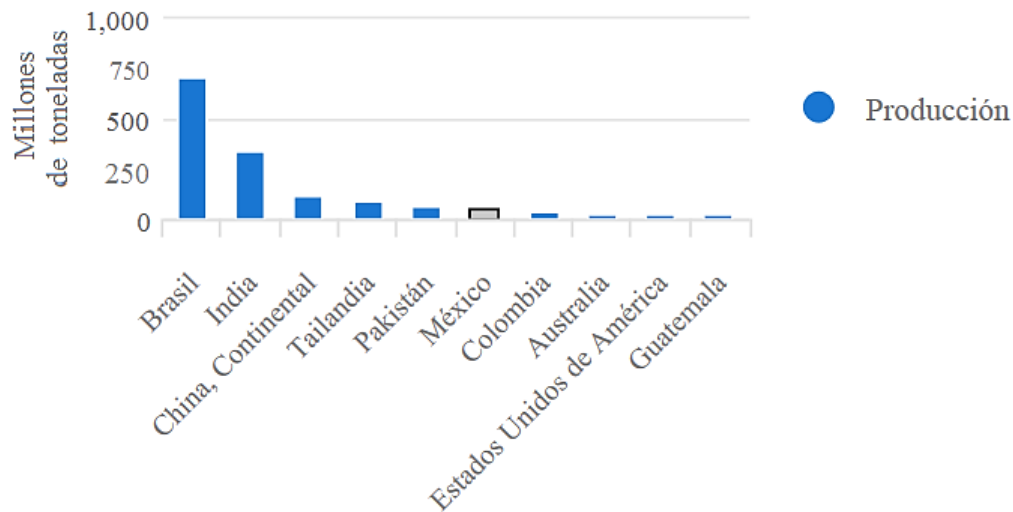


Figura 1.2 Ranking de los países productores de azúcar de caña en el mundo, periodo 2007 a 2017.

La caña de azúcar (*Saccharum* especie híbrida) es una fuente y epicentro de la energía renovable, los biocombustibles y biomateriales, así como un cultivo alimentario es ampliamente reconocido como una fuente de subsistencia rural (Aguilar-Rivera, Rodríguez L., Enríquez R., Castillo M., & Herrera S., 2012). Una amplia gama de productos, como la electricidad, combustibles, productos químicos orgánicos, y papel se puede derivar de ella; así también, en la cosecha y producción de caña es posible obtener sub-productos como lodos, bagazo, melaza, cenizas, y residuos líquidos los cuales representan materias primas potenciales que pueden ser utilizadas para distintos fines productivos (Paturau, 1989).

El éxito de la industria azucarera no ha sido gratuito en términos ambientales. Esta gran dinámica económica lleva conjunta una gran huella ecológica que se refleja en el uso de los recursos naturales y en sus procesos de contaminación asociados. En el campo, se registran grandes cantidades de emisiones producidas por las maquinas usadas para las actividades agrícolas, como la preparación de la tierra para cultivo, la cosecha, etc., no solo las actividades mencionadas anteriormente representan un problema ecológico para la industria, desde la manufactura de los agroquímicos utilizados en la agricultura se generan emisiones que deben ser vigiladas para mitigar los efectos en el cambio climático (Fukushima & Chen, 2009). Un

ejemplo claro es el uso de herbicidas, el depósito de estos químicos es perjudicial en los ambientes receptores, provocando daños graves a los ecosistemas en donde son depositados (Davis et al., 2013). Otro problema principal es el consumo excesivo de recursos renovables y no renovables que se utilizan en el proceso de producción de azúcar; por ejemplo, el uso de combustibles fósiles en la combustión de bagazo; así también, el uso agua que es utilizada en el proceso para la condensación de vapor, las calderas, el lavado de los filtros, etc. Las emisiones al aire, suelo y agua representan un problema grave, sobre todo en los procesos de molienda, en la combustión de las calderas, debido a que se producen grandes cantidades de partículas de carbón y de bagazo.

La producción intensiva de azúcar de caña, puede resultar en graves impactos negativos hacia el medio ambiente. Es por lo anterior, que la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) puede ayudar a comparar y cuantificar esos impactos, además de ser funcionales como indicadores de monitoreo en problemas ambientales, esto le permite convertirse en una metodología confiable. El ACV (supervisado por la norma ISO 14040-44) está diseñado para evaluar los impactos ambientales de la producción, uso y la administración del desperdicio de los bienes. Se puede realizar un ACV para: (1) decisiones involucradas en productos y desarrollos de procesos; (2) decisiones sobre compras; (3) estructura y construcción de información; (4) etiquetado ecológico; (5) declaraciones medioambientales de productos; y (6) decisiones sobre regulaciones (Tukker, 2000). La evaluación se realiza sobre la base del ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y el tratamiento de la materia prima, su industrialización, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización y disposición final. A pesar de que la percepción del ACV en México ha mostrado avances mínimos en su aplicación, ya se han realizado varios intentos, sobre todo en sectores como el gubernamental, industrial y académico, solo falta comunicación y cooperación entre los profesionales que lo aplican para mejorar sus indicadores y generar bases de datos (Güereca, Sosa, Gilbert, & Reynaga, 2015).

Existe una tendencia de la comunidad científica hacia la evaluación de los impactos ambientales a través del ACV en la industria azucarera; sin embargo, aunque el ACV es eficiente en su forma tradicional, presenta inconvenientes en algunas de sus etapas: por

ejemplo, en la obtención de datos en el inventario de ciclo de vida (ICV), en la reducción de impactos ambientales, e interpretación de indicadores; por lo tanto, las técnicas de inteligencia artificial podrían apoyar al ACV para desarrollar una metodología lo suficientemente robusta para hacerle frente a problemas ambientales que se mencionan en los párrafos anteriores.

En el presente trabajo de investigación se estudia y analiza la evaluación de impactos ambientales, el método de solución se basa en la aplicación del ACV y de herramientas como sistemas expertos, algoritmos genéticos, etc. En los siguientes párrafos se describe la problemática, los objetivos, justificación, e hipótesis de este trabajo de investigación.

1.2 Planteamiento del problema

En México, la industria del azúcar de caña ha sido objeto de una creciente presión debido a la deficiencia técnica y tecnológica de sus procesos y al estancamiento del precio del azúcar. Esta presión ha motivado una serie de acciones para mejorar la eficiencia y la diversificación de sus actividades, tanto a nivel de campo como de fábrica. La industria azucarera depende en alto grado de un abastecimiento adecuado de energía, combustibles y recursos que pueden conducir a cambios profundos en el medio ambiente, los cuales pueden tener repercusiones fuertes y deben abordarse adecuadamente en términos de impacto sobre el medio ambiente.

El origen de impacto ambiental de la agricultura de la caña, procede de etapas anteriores, como la manufactura de los agroquímicos. En los campos agrícolas de la región del Papaloapan-Tuxtla, Veracruz, el consumo excesivo de fertilizantes, herbicidas, pesticidas y raticidas generan daños graves al medio ambiente debido a que estos agroquímicos se filtran al suelo y al agua; las emisiones que se van al aire también han repercutido gravemente en el medio ambiente. Es la agricultura de caña, también se producen grandes emisiones por el uso de las máquinas (tractores, camiones, cosechadoras, etc.) usadas para las actividades agrícolas y que ocupan grandes volúmenes de combustibles fósiles. Con respecto a la cogeneración de energía, grandes desechos y emisiones contaminantes se generan de la combustión ineficiente del bagazo, así también del uso de combustibles fósiles de baja calidad. Los impactos ambientales en el ecosistema han contribuido en la reducción de la flora y la fauna acuática. Otro daño ocasionado se refleja en la salud de los habitantes; debido a sustancias tóxicas

cancerígenas y emisiones de orgánicos que son respirados por los habitantes de esta región. En la gestión del agua, se observa la presencia de sólidos contaminantes, entre otras sustancias peligrosas para los humanos.

1.3 Hipótesis

La presente propuesta ayudará a través de la metodología basada en el Análisis de Ciclo de Vida y técnicas de inteligencia artificial a reducir los costos de materia prima y energía, reducir los recursos, así también a minimizar los impactos ambientales en la salud humana, la calidad del ecosistema, el cambio climático y la administración de recursos en la cadena de suministro del azúcar de caña.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una estrategia metodológica basada en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) que apoye el proceso de toma de decisiones en la mejora del desempeño ambiental, económico y de recursos de la cadena de suministro del azúcar de caña, por medio de la optimización, modelación de incertidumbre y simulación de las etapas del ACV.

Objetivos específicos

1. Establecer un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de entradas y salidas del sistema a través de la recolección de datos o simulación (herramientas de toma de decisiones) del proceso de producción de azúcar con el objetivo de conocer sus variables y los factores inciertos que intervienen en el sistema.
2. Clasificar, caracterizar, y evaluar las emisiones para conocer los impactos generados en la cadena de suministro del azúcar de caña, apoyado con el software SimaPro, la metodología IMPACT 2002+ y la SMC.
3. Identificar los procesos o actividades más significativas para determinar cuál es la actividad que tiene mayor contribución al medio ambiente, con el fin de redactar recomendaciones o crear modelos que puedan reducir los recursos y los impactos

medios o las categorías punto final (calidad del ecosistema, cambio climático, salud humana y la administración de recursos).

4. Desarrollar un modelo difuso capaz de estimar las tasas correctas de fertilizantes en los campos de la región Papaloapan-Tuxtla, de tal forma que aporte a los productores y a la empresa Excelencia Cañera ayuda para tomar mejores decisiones.
5. Desarrollar un modelo matemático de la cadena de suministro del azúcar de caña, considerando la incertidumbre del modelo, y sujeto a variables de decisión y funciones objetivo basadas en criterios ambientales y económicos.
6. Optimizar el modelo matemático con Algoritmos Genéticos en el software Multigen, con el propósito de minimizar los impactos ambientales en la calidad del ecosistema, el cambio climático, la salud humana y la administración de recursos.

1.5 Justificación

La demanda elevada de productos está ejerciendo una presión cada vez mayor sobre los recursos de la tierra que, para satisfacer las necesidades de la creciente población, será necesaria la intensificación de la agricultura (Godfray et al., 2010). Además, se están produciendo nuevos impactos en la tierra y en los recursos naturales, como la sequía, el desequilibrio en los ciclos del agua y el aumento de las temperaturas, como resultado del cambio climático y de las actividades antropogénicas (Black et al., 2011). La demanda de azúcar es muy alta en el mercado mundial, lo que ocasiona un consumo elevado de recursos que provocan problemas serios al medio ambiente; aunque algunos subproductos como el bagazo, la melaza, la torta de filtro y la ceniza (algunos utilizados como recurso de entrada en otros procesos) se reutilizan de forma óptima para reducir los residuos y contaminantes producidos, aun no es suficiente para mejorar el desempeño ambiental (P. Roy et al., 2009). Por esta razón, se plantea esta propuesta metodológica para la evaluación (ACV), y la optimización (OMAG) de los impactos ambientales en la cadena de suministro de la producción de azúcar de caña; asimismo se propone el desarrollo de un SEAD como en la fertilización de los campos.

El ACV es muy útil para analizar y reducir los efectos ambientales; aunque la aplicación del ACV ha sido eficiente en su forma tradicional, su credibilidad puede cuestionarse si sus

resultados no van acompañados de análisis de incertidumbre adecuados. Presentar los resultados simplemente como estimaciones puntuales sin distribuciones de incertidumbre es una sobreestimación irrazonable de su exactitud (Björklund, 2002). Aunque existen intentos por tratar la incertidumbre aún son insuficientes; es por lo anterior, que nuevas metodologías que cuantifican el riesgo en los indicadores ambientales se han desarrollado (Alexander, Barton, Petrie, & Romagnoli, 2000), por ejemplo, la Simulación Monte Carlo (SMC), las técnicas de Inteligencia Artificial (IA), o bases de datos como Ecoinvent que contiene información muy confiable y actualizada (algunos datos ya incluyen incertidumbre) (Ecoinvent, 2018). En la actualidad el software SimaPro puede apoyar en el análisis y monitoreo de las diferentes etapas que incluye la interpretación del ACV (PRÉ CONSULTANTS B.V., 2018). Los resultados del ACV solo describen el desempeño ambiental de un proceso; sin embargo, se requieren de alternativas que permitan mejorar estos resultados (Alexander et al., 2000; Komly, Azzaro-Pantel, Hubert, Pibouleau, & Archambault, 2012), es aquí donde se puede abordar el concepto de Algoritmos Genéticos (AGs). En particular, los AGs y la optimización multiobjetivo permiten encontrar la mejor combinación de las variables y parámetros inciertos que minimicen los impactos ambientales. La agricultura requiere que las tasas de los fertilizantes se estimen con cuidado y eficiencia para proteger y mantener el medio ambiente (Dengel, 2013), si bien existen recomendaciones como las que ofrecen los laboratorios, estos datos suelen ser inexactos, contradictorios o confusos, con frecuencia, estas recomendaciones no reflejan las tasas correctas; por lo tanto, tomar decisiones basadas en lo anterior es lo menos indicado. Chen, Jakeman, & Norton, (2008) proponen el uso de técnicas de IA como los SEAD basados en lógica difusa, entre otros, para modelar problemas ambientales, este tipo de sistemas son especialmente útiles cuando existe incertidumbre o subjetividad cuando se toman decisiones en un campo particular del conocimiento.

En el presente documento, se propone una metodología basada en el ACV (de la cuna a la puerta) para evaluar los diferentes impactos generados por la cadena de suministro completa de la producción de azúcar de caña. Primero, se propone llevar a cabo el ICV a través de cuestionarios (bajo la norma ISO 14041) y bases de datos internacionales (ECOINVENT), además de incluir SMC, y el uso de software especializados como SimaPro. A partir del ICV

se propone clasificar, caracterizar y evaluar las emisiones, con el fin de conocer sus impactos a través de la metodología IMPACT 2002+ (IMPact Assessment of Chemical Toxics). Asimismo, se propone desarrollar un modelo matemático a partir del ACV que permita optimizar los recursos en los procesos, y minimizar los impactos ambientales a través de la técnica de AGs multiobjetivo. Finalmente, se propone un SEAD basado en lógica difusa para estimar las tasas correctas de fertilizantes, la arquitectura de este sistema está apoyada con IC y la experiencia de dos grupos de expertos agrónomos. Para el desarrollo de la presente propuesta el Grupo Porres S.A. de C.V. a través del Grupo azucarero *San Pedro S.A. de C.V.* y la empresa *Excelencia Cañera*, participará facilitando estancias en el ingenio y la empresa, aportando información necesaria y asesoría de los expertos en beneficio del desarrollo del proyecto.

1.6 Conclusiones

En este capítulo se describieron los países y niveles producción de azúcar de caña a nivel mundial; así también las consecuencias ambientales por la fabricación intensiva de azúcar. La información de este capítulo indica que las cargas ambientales en la producción de azúcar de caña no se han evaluado correctamente y podrían estar ocasionando impactos ambientales graves al aire, agua y suelo, esto implica afectaciones ambientales graves, además de cambios en la administración de recursos y con consecuencias sanitarias en la salud humana de los habitantes de esta región.

Los problemas ambientales en su mayoría son de carácter multidisciplinario, lo que implica recurrir a diversas disciplinas o herramientas que permitan modelar estos problemas. Cuando existe incertidumbre en el ACV, es importante recurrir a diferentes técnicas que mejoren algunas de las etapas del ACV. Esta metodología se caracteriza por el análisis de poca información donde se manipulan altos niveles de datos; las técnicas IA son útiles porque dan soluciones a problemas complejos y con demasiada información. Incluir técnicas de IA en el ACV no solo se limita a ciertas etapas, también pueden ser eficientes para análisis particulares en diferentes procesos de un ACV. Por esta razón, el uso ACV apoyado por técnicas de IA podría ayudar a mejorar estado actual y hacer frente a este problema ambiental.

Capítulo II

Marco Teórico

Resumen

En este capítulo, se describen los conceptos técnicos-teóricos utilizados en este trabajo de investigación, incluyendo la descripción de las actividades de la industria azucarera; además de la descripción básica de las herramientas técnicas (Inteligencia Artificial y software de ACV) que son utilizadas para el desarrollo y validación de los modelos; así también se explican las razones por las cuales fueron utilizadas, y sus ventajas al aplicarlas.

2.1 Análisis de ciclo de vida (ACV)

El ACV es una herramienta para evaluar los impactos ambientales potenciales y recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida de un producto. El ACV es una evaluación integral y considera todos los atributos o aspectos del medio ambiente natural, la salud humana y los recursos (Finnveden et al., 2009).

El ACV es la recopilación y evaluación de las entradas - salidas y los impactos ambientales potenciales de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida (Guinée et al., 2011). Un ACV completo "de la cuna a la tumba" considera cada paso del ciclo de vida: diseño, desarrollo del producto, adquisición de materias primas, fabricación, distribución, mantenimiento, reutilización y actividades al final de su vida útil (Jacquemin, Pontalier, & Sablayrolles, 2012). El ACV se lleva a cabo por un profesional o analista que apoye el proceso de toma de decisiones, eligiendo la mejor opción posible para el medio ambiente (Herrmann, Hauschild, Sohn, & McKone, 2014). En la Figura 2.1, se observan las etapas para la implementación del ACV (Rebitzer et al., 2004).

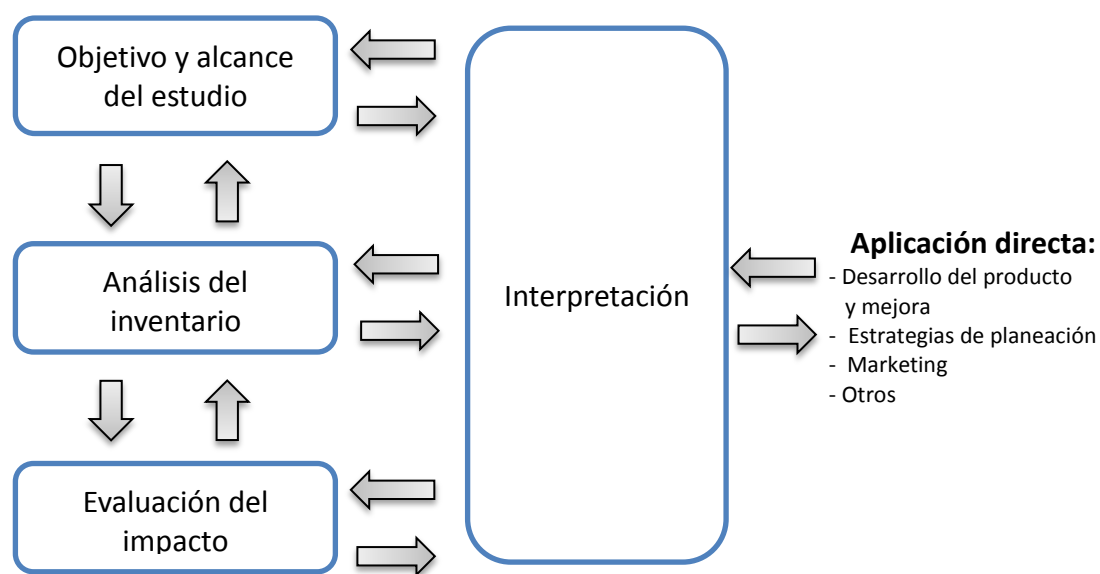


Figura 2.1 Fases y aplicación de un ACV (basado en ISO 14040, 1997)

El ACV comprende cuatro etapas o fases, relacionadas entre sí:

2.1.1 Definición de objetivo y alcances

La definición del objetivo y alcances es quizás el componente más importante de un ACV, porque el estudio se lleva a cabo de acuerdo con las declaraciones realizadas en esta fase, que define el propósito del estudio, el producto esperado del estudio, los límites del sistema, la unidad funcional (UF) y los supuestos. El límite de un sistema a menudo se ilustra mediante un diagrama de flujo de entrada y de salida general. Todas las operaciones que contribuyen al ciclo de vida del producto, proceso o actividad caen dentro de los límites del sistema. El propósito de UF es proporcionar una unidad de referencia a la que los datos de ICV se normalizan. La definición de UF depende de la categoría de impacto ambiental y del objetivo de la investigación (P. Roy et al., 2009).

2.1.2 Análisis del inventario de ciclo de vida

El ICV es una técnica sistemática para identificar y cuantificar, controlar y evaluar la información de los resultados del ICV y la evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV), y comunicarse de manera efectiva. Esta evaluación puede incluir medidas tanto cuantitativas como cualitativas de mejora, tales como cambios en el producto, proceso y diseño de la actividad, materia prima de uso, procesamiento industrial, consumo y gestión de residuos (P. Roy et al., 2009).

2.1.3 Evaluación de impactos

La EICV tiene como objetivo comprender y evaluar los impactos ambientales sobre la base del análisis de ICV, en el marco del objetivo y el alcance del estudio. La EICV consiste en la agregación y la identificación de las cargas ambientales cuantificadas en el análisis del ICV, en las categorías de impacto ambiental (Azapagic & Clift, 1999). En esta fase, los resultados del ICV se asignan a las diferentes categorías de impacto, basado en los tipos esperados de los impactos sobre el medio ambiente. Pasar de un ICV a la EICV es uno de los pasos más difíciles del ACV (Owens, 1997), por este motivo, se han desarrollado diferentes metodologías para la evaluación durante las dos últimas décadas: EDIP97, Eco-indicador 99, LMC 2001 (Dreyer, Niemann, & Hauschild, 2003), IMPACT 2002 + (Jolliet et al., 2003). La EICV generalmente consta de los siguientes elementos: clasificación, caracterización, normalización y valoración. La clasificación es el proceso de asignación y la agregación

inicial de datos del ICV en grupos de impacto comunes. La caracterización es la evaluación de la magnitud de los impactos potenciales de cada flujo de inventario en su impacto ambiental correspondiente. La caracterización ofrece una manera de comparar directamente los resultados del ICV dentro de cada categoría. Los factores de caracterización se refieren comúnmente como factores de equivalencia. La normalización expresa los impactos potenciales de manera que se pueden comparar. La valoración es la evaluación de la importancia relativa de las cargas ambientales identificadas en la clasificación, caracterización, y etapas de normalización asignándoles ponderación que les permite ser comparados o agregados (P. Roy et al., 2009).

De acuerdo con la International Organization for Standardization (ISO), los resultados del ICV se clasifican primero en categorías de impacto. Un indicador de la categoría, que representa la cantidad de impacto potencial se puede ubicar en cualquier lugar entre los resultados del ICV y la categoría de punto final. Sobre la base de este formato, dos escuelas principales de métodos se han desarrollado:

- a) La EICV requiere modelos cuantitativos antes del final de las vías de impacto y resultados del ICV; unen las categorías del punto medio, por ejemplo, agotamiento del ozono o la acidificación.
- b) Los métodos orientados a daños (por ejemplo Ecoindicador 99: Goedkoop y Spriensma 2000, EPS: Steen 1999) apuntan a los resultados del ACV que son más fáciles de interpretar para mayor ponderación, mediante el modelado de la cadena causa-efecto a los daños al medio ambiente, a la salud humana, al medio natural y al uso de recursos naturales (Jolliet et al., 2004).

Diferentes métodos se han desarrollado para realizar la ponderación de los impactos ambientales, algunos de los métodos son los siguientes: Eco-indicador '95, Eco-indicador '99 CML 1992, CML 2 baseline 2000, Ecopuntos '97, EDIP/UMIP '96, EPS 2000, IMPACT 2002+. De los anteriores, el método propuesto para esta investigación es el método IMPACT 2002+.

La metodología IMPACT 2002+, propone una implementación de enfoque combinado de punto medio/daño. La Figura 2.2 muestra el esquema general de la metodología IMPACT 2002+, que une todos los tipos de resultados del ICV a 15 categorías de punto medio (toxicidad humana, efectos respiratorios, la radiación, el agotamiento de la capa de ozono, la oxidación fotoquímica, la ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre ionizante, acidificación/nutricación terrestre, acidificación acuática, la eutrofización acuática, la ocupación del suelo, el calentamiento global, la energía no renovable, la extracción de minerales), y después a cuatro categorías orientadas a daño (salud humana, la calidad del ecosistema, el cambio climático, y los recursos). Los factores de caracterización del punto medio se basan en principios de equivalencia, es decir, las puntuaciones de la caracterización del punto medio se expresan en kg equivalentes de una sustancia en comparación con una sustancia de referencia (Jolliet et al., 2003).

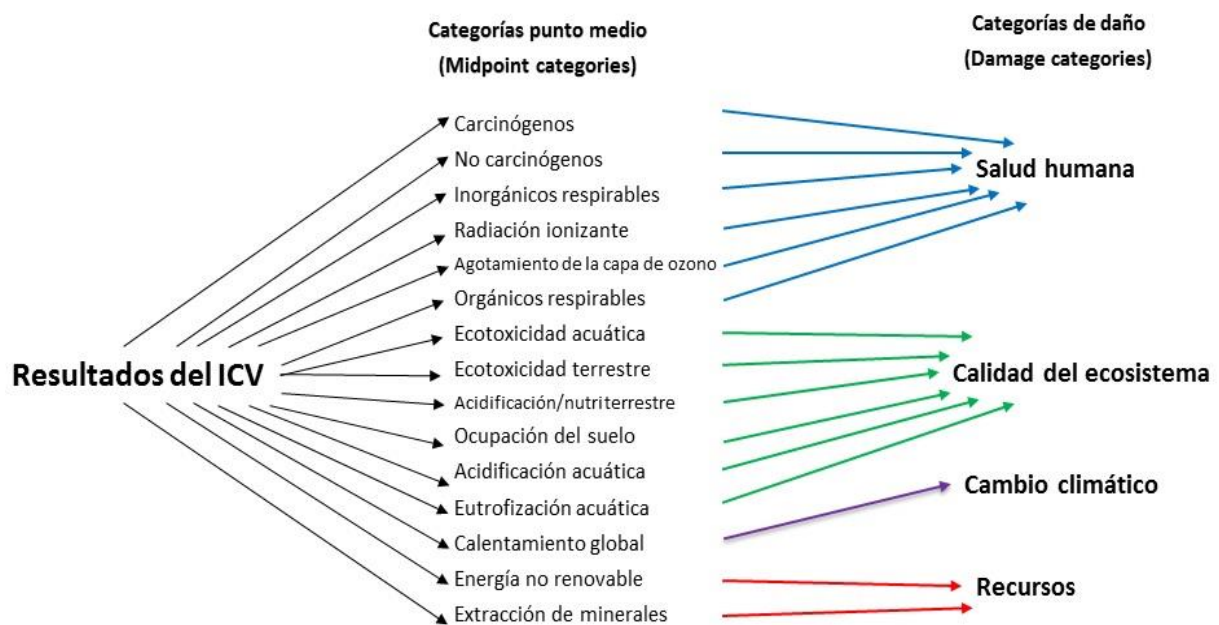


Figura 2.2 Marco general de la metodología IMPACT 2002+.

2.1.4 Interpretación del ciclo de vida

La interpretación del ciclo de vida es un proceso sistemático para identificar, calificar, verificar y evaluar la información de los resultados del ICV y/o la EICV del sistema producto

y se presenta en orden para satisfacer los requerimientos de la aplicación como describe el propósito y alcance del estudio (ISO 14043, 2000).

El objetivo final de esta fase de acuerdo con las normas actuales es obtener conclusiones y hacer recomendaciones que reflejen los principales problemas y el elemento de evaluación (Finkbeiner, Inaba, Tan, Christiansen, & Klüppel, 2006). La ISO ha definido dos objetivos de la interpretación del ciclo de vida:

- 1) Analizar los resultados, obtener conclusiones, explicar las limitaciones y formular recomendaciones basadas en los resultados de las fases anteriores del ACV e informar los resultados de la interpretación del ciclo de vida de manera transparente.
- 2) Proporcionar una presentación fácilmente comprensible, completa y coherente de los resultados de un estudio de ACV, de acuerdo con el propósito y alcance del estudio (Skone, 2000).

2.2 Industria azucarera

Una forma de obtener azúcar es a partir de la caña. La caña de azúcar se produce en los campos agrícolas, en esta etapa, el proceso incluye la agricultura, el corte, la carga y el transporte del producto al ingenio. Más adelante el proceso se complementa con la manufactura de azúcar, la cual incluye la molienda de caña de azúcar, la clarificación de jugos, la evaporación, la cristalización y separación centrífuga. Otros procesos se pueden agregar como la cogeneración de electricidad a partir del bagazo o la producción de etanol, entre otros, la Figura 2.3 describe la cadena de suministro de la producción de azúcar. En los siguientes puntos, se describen los procesos unitarios para producir azúcar.

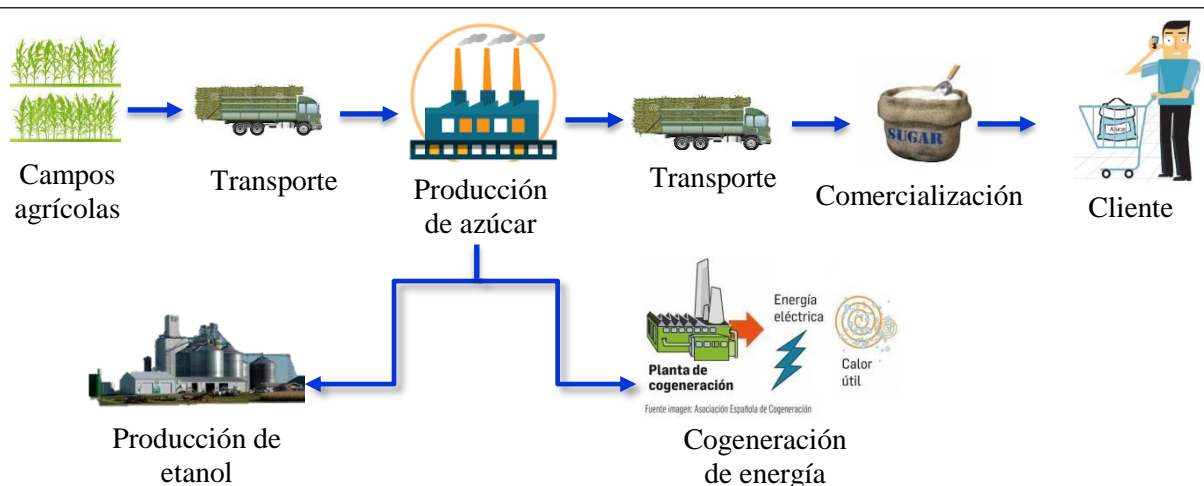


Figura 2.3 Cadena de suministro del procesamiento de la caña de azúcar.

2.2.1 Agricultura de la caña de azúcar

La caña de azúcar es una hierba perenne que proviene de las zonas tropicales y subtropicales y su crecimiento inicial incluye la germinación y el macollaje (Li & Solomon, 2003). Las diferencias climáticas, tipos de suelo y las variaciones en el resultado de la práctica agrícola tienen como resultado rendimientos muy variados en los campos cultivados, desde los 9 meses hasta casi 2 años entre cosechas (Coombs, 1984). La caña de azúcar es plantada para su cultivación por los agricultores o los plantadores mecánicos. La caña de azúcar necesita tierra bien drenada para crecer adecuadamente y requiere de la aplicación regular de agroquímicos. Los campos de caña de azúcar deben ser tratados de forma rutinaria para obtener un crecimiento óptimo. El riego también es necesario en el cultivo de la caña para mejorar la intensidad de plantación (Lestari, Bohez, Ciptomulyono, & Perret, 2013).

2.2.2 Transporte de caña de azúcar

El transporte de la caña de azúcar consiste en recolectar la materia prima disponible en campo con alta eficiencia, garantizando el suministro de caña oportuno y suficiente a la fábrica, en el menor tiempo entre cosecha y molienda, con bajos niveles de materias extrañas (especialmente de hojas, despunte y tierra) y al menor costo, pues el propósito es obtener azúcar de alta calidad y a precios competitivos. Su incidencia en los costos de producción siempre ha tenido alta significancia, por lo que cualquier variación que se registre en esta etapa, resultará de gran impacto en la rentabilidad del producto. En el mercado existen

diversas opciones de equipos para el transporte de caña cortada ya sea picada o entera, entre los más innovadores se encuentran los siguientes:

Vehículos con capacidad de arrastre combinado de hasta 120 toneladas, que cuentan con una configuración de camión rígido que les permite no solo funcionar como vehículos de arrastre, sino también para cargar volcos sobre su bastidor con una capacidad técnica de carga sobre el bastidor de 26 toneladas, vehículos hechos para operar en los terrenos difíciles que se presentan en los campos e ingenios (CONADESUCA, 2015a).

Otra modalidad de transporte es a través de tractores de 230 a 275 HP remolcando trenes de vagones con carga neta de caña cortada entera de 8 a 12 toneladas o de 34 a 45 m³ de capacidad repartidas en 4 o 5 vagones (CONADESUCA, 2015a).

El envío de la caña de azúcar de los campos a la fábrica en el momento de la cosecha, es un proceso que incluye el corte, carga, transporte y descarga. Este ciclo se repite continuamente durante el día hasta que el equipo de trabajo cumple con su cuota diaria de labores (Díaz & Pérez, 2000).

2.2.3 Manufactura de azúcar de caña

Anteriormente, la industria azucarera solo producía azúcar; sin embargo, hoy en día combina la manufactura de azúcar con centrales eléctricas y destilerías que producen azúcar, electricidad y etanol respectivamente (Chauhan, Chaudhary, & Kumar, 2011).

Inicialmente, la caña de azúcar se lava para eliminar una cantidad excesiva de tierra, rocas y basura. Después de lavarla, la caña de azúcar se procesa utilizando cuchillas giratorias y trituradoras que reducen la caña alimentado al molino en pequeños trozos adecuados para el proceso de extracción posterior. El sistema de extracción de jugo separa el bagazo y el jugo por compresión de la caña de azúcar. El bagazo se utiliza como combustible en el sistema de cogeneración y el jugo crudo producido se suministra al sistema de tratamiento (Ensinas, Nebra, Lozano, & Serra, 2007).

2.2.3.1 Tratamiento del jugo

El jugo crudo tiene algunas impurezas sin azúcar que se eliminan con la ayuda de la mezcla de algunos reactivos químicos como el azufre y la cal, entre otros, siendo necesario el calentamiento del jugo para las reacciones de purificación. Más adelante, el jugo pasa a través de un tanque flash, antes de entrar en el clarificador. El remanente precipitado y formado en el clarificador, se separa del jugo clarificado y es dirigido a los filtros. Después de la filtración, parte del jugo vuelve al proceso por delante del clarificador, y la torta de filtro se rechaza. El jugo clarificado puede entonces dirigirse al sistema de evaporación. El tratamiento de jugo para el etanol y la producción de azúcar pueden ser muy similar y diferir en la etapa de adición de azufre, que se utiliza exclusivamente para la producción de azúcar (Ensinas et al., 2007).

2.2.3.2 Ebullición, cristalización, separación centrifuga y secado de azúcar

Después del tratamiento del jugo, el jugo o el jarabe clarificado se calienta (con la ayuda del vapor que produce el bagazo) para reducir el contenido de agua en el jarabe y se forma el cristal de azúcar. En este proceso, el contenido de sacarosa aumentará debido a la reducción del contenido de agua en el jarabe (Chauhan et al., 2011). Después de eso, los cristales de azúcar se separan de la melaza usando centrífugas. El secador de azúcar consume vapor de escape para reducir el contenido de humedad del azúcar (Ensinas et al., 2007).

2.2.4 Cogeneración de electricidad a partir de la caña de azúcar

La bioelectricidad se produce desde hace décadas en esta agroindustria, utilizando el bagazo como combustible en sistemas de cogeneración que atienden también, con elevada eficiencia, las necesidades de potencia mecánica y de calor de proceso (CONADESUCA, 2016b). La cogeneración se define como la producción de energía eléctrica producida conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambos. Los sistemas de cogeneración de energía eléctrica alcanzan una eficiencia muy superior a los sistemas convencionales mediante el aprovechamiento de calor de desecho no aprovechado y reducción de pérdidas de energía innecesarias, permitiendo lograr ahorros considerables a mediano y largo plazo. En la mayor parte de las empresas del sector industrial, la energía térmica y eléctrica son insumos indispensables. Cuando estas dos formas de energía se requieren de manera conjunta en un proceso productivo, se presenta la oportunidad de implantar sistemas de cogeneración, lo cual

lleva, de manera simultánea, a obtener una mayor eficiencia en el uso de combustibles fósiles y menor producción de emisiones contaminantes por unidad de energía útil. En términos de lo establecido en la Fracción II del Artículo 36 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) y del Artículo 103 de su Reglamento, existen tres formas distintas de cogeneración de energía eléctrica (Quintana Monasterio, 2012):

1. La producción de energía eléctrica conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambas (conocidos como sistemas superiores).
2. La producción directa o indirecta de energía eléctrica, a partir de energía térmica no aprovechada en los procesos de que se trate (conocidos como sistemas inferiores).
3. La producción directa o indirecta de energía eléctrica, utilizando combustibles producidos en los procesos de que se trate.

El impulso a la cogeneración representa una de las mayores oportunidades para lograr un mejor aprovechamiento en el consumo de energía en las empresas y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Quintana Monasterio, 2012). Durante décadas, la producción de energía eléctrica se limitaba a atender las necesidades propias de la agroindustria, pero con el tiempo, ha sido posible incrementar el desempeño de los sistemas de cogeneración que han producido excedentes para la red pública, contribuyendo a la oferta de electricidad en muchos países, logrando una creciente importancia económica (CONADESUCA, 2016b).

2.3 Análisis de incertidumbre ambiental

Los problemas de contaminación ambiental son problemas complejos con implicaciones mundiales. La introducción al medio ambiente de materiales tóxicos puede repercutir en riesgos para la salud humana y para la ecológica. El manejo efectivo de la contaminación ambiental se ha convertido en un importante problema ambiental que seguirá siendo un problema social en crecimiento durante los próximos años. La evaluación de riesgo ambiental (ERA) consiste en evaluar la probabilidad de los efectos adversos en el medio ambiente o su ocurrencia como consecuencia de la exposición a agentes físicos, químicos o biológicos. La ERA requiere el conocimiento de los efectos adversos que pueden ser causados por la exposición a sustancias o materiales químicos, y los efectos de los efectos adversos en el medio ambiente, incluida la población (Sonnemann, Francesc, & Schuhmacher, 2003).

2.3.1 Simulación Monte Carlo en el ACV

La alta incertidumbre presente en la implementación de los estudios de evaluación de riesgos ambientales y de ciclo de vida introduce una limitación crucial a la hora de interpretar el impacto ambiental y las estimaciones de daños proporcionadas por estas metodologías (Sonnemann et al., 2003).

La simulación Monte Carlo (SMC) es una herramienta que simula un rango probable de resultados dado un conjunto de condiciones variables y se puede aplicar dentro de una evaluación de riesgo o un marco de ICV para capturar la variabilidad de los parámetros. La SMC es una técnica utilizada para cuantificar la variabilidad y la incertidumbre mediante el uso de distribuciones de probabilidad. A cualquier variable independiente con un rango de estimaciones o valores posibles se le puede asignar una distribución de probabilidad. Las distribuciones de salida se generan mediante muestreos repetidos y aleatorios de las distribuciones de probabilidad. Una distribución de resultados simulada puede mostrar el escenario más probable, así como los casos extremos que ocurren con poca frecuencia. El uso de rangos de datos que incorporan la variabilidad del sistema en términos de geografía, variación anual y prácticas agrícolas permitirá a los tomadores de decisiones ver un rango de resultados posibles además de los valores promedio para todo el sistema (Miller, Landis, & Theis, 2006).

Para llevar a cabo la SMC en el ICV se deben compilar los datos del inventario. Si se consideraran todos los parámetros que podrían tener repercusiones en el resultado final, se debería realizar un estudio exhaustivo; sin embargo, no todos estos datos son relevantes. Por lo tanto, solo se deben seleccionar los factores más relevantes y, para algunos parámetros, se puede asumir que tienen valores fijos. Una vez seleccionados los factores esenciales, se realiza una caracterización de las distribuciones de probabilidad. Por lo tanto, los datos se clasifican en dos grupos: datos ampliamente disponibles, para los cuales se puede calcular el promedio y la desviación estándar, y datos basados en poca información, para los cuales se deben considerar las estimaciones de expertos y de la literatura. Todos estos parámetros alimentan la SMC, que proporciona los resultados en forma de una distribución de probabilidad alrededor

de un valor medio y permite realizar un análisis detallado de sensibilidad. Lo anterior se describe en el diagrama de decisión de la Figura 2.4 (Sonnemann et al., 2003).

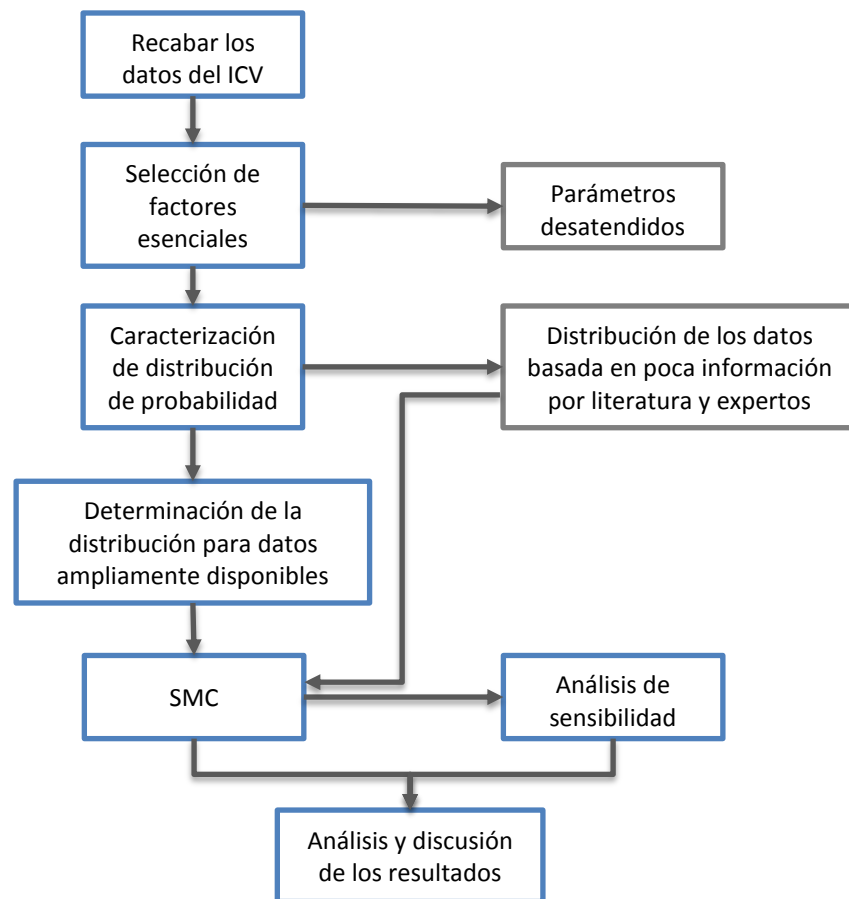


Figura 2.4 Proceso para la evaluación de incertidumbre y variabilidad en el ICV.

2.4 Inteligencia artificial

Según Schalkoff, la IA se define como un campo de estudio que busca explicar y emular el comportamiento inteligente en términos de procesos computacionales (Russell & Norvig, 1995). Las técnicas de IA son cada vez más útiles como enfoques alternativos a las técnicas convencionales o como componentes de sistemas integrados para resolver problemas complejos en diversas áreas. Algunas características de estas técnicas son: aprender de los ejemplos, son tolerantes a las fallas en el sentido de que son capaces de manejar datos ruidosos e incompletos, son capaces de tratar problemas no lineales y una vez entrenados pueden realizar predicciones y propagarse rápidamente (Mellit, Kalogirou, Hontoria, & Shaari, 2009).

El uso de la IA en el modelado de aspectos ambientales ha aumentado. Estas técnicas se están utilizando como alternativas en los sistemas ambientales. Los más utilizados son los sistemas basados en reglas, redes neuronales artificiales (RNA), modelos difusos, AG, autómatas celulares, sistemas multi-agentes, inteligencia de enjambre, aprendizaje de refuerzo y sistemas híbridos (Chen et al., 2008).

2.4.1 Algoritmos genéticos

Los problemas de optimización se pueden encontrar en muchos dominios, desde las ciencias naturales hasta las matemáticas y la informática, desde la ingeniería hasta la vida social y cotidiana. Cuando la tarea es minimizar un error, minimizar la energía, el peso, el desperdicio, el esfuerzo y maximizar la ganancia, el resultado, el éxito y los puntajes, nos enfrentamos a problemas de optimización. Los algoritmos genéticos (AGs) son métodos excelentes para problemas difíciles de optimización, donde los métodos de optimización clásicos fallan debido a características difíciles. Tales condiciones pueden ser inestabilidad, no derivabilidad, ruido y muchas otras (Kramer, 2017).

Los AGs fueron inventados por John Holland en el año 1975. Holland propuso el AG como un método heurístico basado en la "Supervivencia del más apto". El AG fue descubierto como una herramienta útil para problemas de búsqueda y optimización (Sivanandam & Deepa, 2008). Un AG se define como un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales usando operaciones modeladas según la reproducción darwiniana y supervivencia del más apto, presentando operaciones genéticas entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres de longitud fija (letras o números) que se ajusta al modelo de las cadenas de los cromosomas y están asociados con alguna función matemática que refleja su aptitud (Koza, 1992).

Un AG maneja una población de posibles soluciones. Cada solución se representa a través de un cromosoma, que es solo una representación abstracta. La codificación de todas las soluciones posibles en un cromosoma es la primera parte, pero en realidad no es la más sencilla de un AG. También hay que determinar un conjunto de operadores de reproducción.

Los operadores de reproducción se aplican directamente en los cromosomas y se utilizan para realizar mutaciones y recombinaciones sobre las soluciones del problema. Los operadores de representación y reproducción apropiados son realmente determinantes, ya que el comportamiento del AG depende en gran medida de ello. Con frecuencia, puede ser extremadamente difícil encontrar una representación que respete la estructura del espacio de búsqueda y los operadores de reproducción, que son coherentes y relevantes de acuerdo con las propiedades de los problemas (Sivanandam & Deepa, 2008).

La selección se realiza mediante el uso de una función de fitness. Cada cromosoma tiene un valor asociado correspondiente a la aptitud de la solución que representa. La aptitud debe corresponder a una evaluación de qué tan buena es la solución candidata. La solución óptima es la que maximiza la función de fitness. Los AGs se ocupan de los problemas que maximizan la función de fitness. Pero, si el problema consiste en minimizar una función de costo, la adaptación es bastante fácil. O bien la función de costo puede transformarse en una función de aptitud, por ejemplo, invirtiéndola; o la selección se puede adaptar de tal manera que consideren que los individuos con funciones de evaluación bajas son mejores. Una vez que la reproducción y la función de aptitud se han definido correctamente, se evoluciona un algoritmo genético de acuerdo con la misma estructura básica. Comienza generando una población inicial de cromosomas. Esta primera población debe ofrecer una amplia diversidad de materiales genéticos. El acervo genético debe ser lo más grande posible para que pueda generarse cualquier solución del espacio de búsqueda. Generalmente, la población inicial se genera aleatoriamente. Luego, el algoritmo genético recorre un proceso de iteración para hacer que la población evolucione. Cada iteración consta de los siguientes pasos:

1. Selección: El primer paso consiste en seleccionar individuos para la reproducción. Esta selección se realiza aleatoriamente con una probabilidad que depende de la aptitud relativa de los individuos, de modo que los mejores a menudo se eligen para la reproducción en lugar de los pobres (Sivanandam & Deepa, 2008).
2. Cruce (Crossover): permite la combinación del material genético de dos o más soluciones. Después de seleccionar a los individuos, deben ser empleados para crear la nueva generación. En la naturaleza, los cromosomas en los genes de un hombre y una mujer se combinan para producir un nuevo cromosoma. Esto se simula mediante la

combinación de dos soluciones (soluciones padres) seleccionadas por la rueda de la ruleta para producir dos nuevas soluciones (soluciones hijos) en el AG (Mirjalili, 2019).

3. Mutación: produce cambios aleatorios espontáneos en varios cromosomas. Una forma sencilla de lograr la mutación sería alterar uno o más genes. En los AGs, la mutación cumple el papel crucial de (a) reemplazar los genes perdidos de la población durante el proceso de selección para que puedan probarse en un nuevo contexto o (b) proporcionar los genes que no estaban presentes en la población inicial (Gen, Cheng, & Lin, 2008). En la Figura 2.5 se observan los operadores de los AGs (Gallardo, 2013).

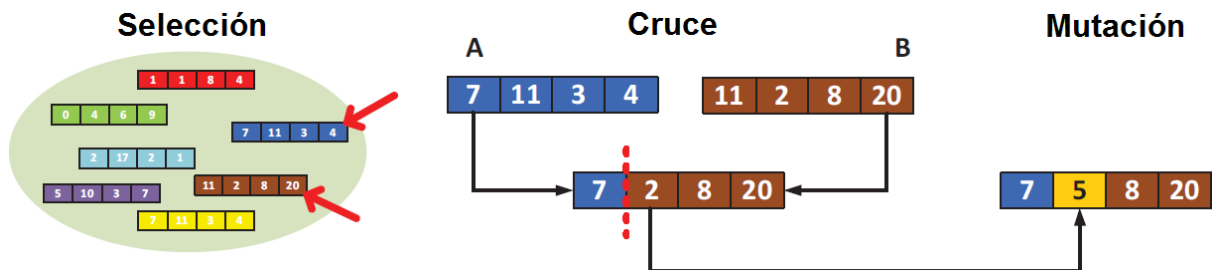


Figura 2.5 Operadores básicos de los AGs.

2.4.2 Algoritmos genéticos multiobjetivo

La optimización de problemas, se ocupa de buscar soluciones sobre un conjunto de posibles opciones para optimizar ciertos criterios. Si solo existe un criterio, se convierten en problemas de optimización monoobjetivo. Si existe más de un criterio que debe resolverse simultáneamente, entonces se tiene un problema de optimización multiobjetivo (Gen et al., 2008).

Los problemas en la optimización multiobjetivo surgen en el diseño, modelado y planificación de muchos sistemas reales complejos en las áreas de producción industrial, transporte urbano, presupuesto de capital, manejo forestal, manejo de reservorios, diseño y paisajismo de nuevas ciudades, distribución de energía, etc. es fácil ver que casi todos los problemas importantes de decisiones del mundo real involucran múltiples objetivos y conflictos, que deben abordarse respetando las diversas limitaciones, lo que lleva a una abrumadora complejidad de los

problemas. Hay una cantidad de investigadores que han hecho contribuciones significativas al problema. Entre ellos, Pareto es quizás uno de los pioneros más reconocidos en el campo. Recientemente los AG's ha recibido una atención considerable como un enfoque novedoso para los problemas de optimización multiobjetivo, lo que resulta en un nuevo cuerpo de investigación y aplicaciones (Gen et al., 2008).

Un problema de optimización monoobjetivo se da generalmente en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \max z &= f(x) \\ \text{s. t. } g_i(x) &\leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ x &\geq 0 \end{aligned} \tag{Ec. 2.1}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es un vector de n variables de decisión, $f(x)$ es la función objetivo, y $g_i(x)$ son funciones de restricción de desigualdad m , que forman denotamos el área de soluciones factibles. Por lo general, el área factible en el espacio de decisión con el conjunto S se denota de la siguiente manera:

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, x \geq 0\} \tag{Ec. 2.2}$$

Sin pérdida de generalidad, un problema de optimización multiobjetivo puede representarse formalmente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \max \{z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), \dots, z_q = f_q(x)\} \\ \text{s. t. } g_i(x) &\leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ x &\geq 0 \end{aligned} \tag{Ec. 2.3}$$

A veces se grafica el problema multiobjetivo ya sea en el espacio de decisión así como en el espacio de criterio. S se usa para denotar la región factible en el espacio de decisión y Z se usa para denotar la región factible en el espacio de criterio Z .

$$Z = \{z \in \mathbb{R}^q \mid z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), \dots, z_q = f_q(x), x \in S\} \tag{Ec. 2.4}$$

donde $z \in \mathbb{R}^k$ es un vector de valores de las funciones objetivo q . En otras palabras, Z es el conjunto de imágenes de todos los puntos en S . Aunque S está confinado al orante no negativo de \mathbb{R}^n , Z no se limita necesariamente al orante no negativo de \mathbb{R}^q (Gen et al., 2008).

2.4.3 TOPSIS

Uno de los métodos de análisis de decisión multicriterio más populares es el método TOPSIS (technique for order performance by similarity to ideal solution), este método fue desarrollado por Hwang y Yoon en 1981. El principio básico de TOPSIS es que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta a la solución ideal y la distancia más lejana a la solución ideal negativa (Yue, 2011).

El procedimiento de TOPSIS consiste en los siguientes pasos (Opricovic & Tzeng, 2004):

1. Calcular la matriz de decisión normalizada. El valor normalizado r_{ij} se calcula como

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}},$$

$j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n.$ Ec. 2.5

2. Calcular la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado v_{ij} se calcula como

$$v_{ij} = w_{ij}r_{ij}, \quad j = 1, \dots, J; \quad i = 1, \dots, n,$$
 Ec. 2.6

donde w_i es el peso del atributo i th o criterio, y $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

3. Determinar la solución ideal (A^*) y la solución ideal negativa (A^-).

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$$
$$= \left\{ \left(\max_j v_{ij} \mid i \in I' \right), \left(\min_j v_{ij} \mid i \in I'' \right) \right\},$$
 Ec. 2.7

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}$$
$$= \left\{ \left(\min_j v_{ij} \mid i \in I' \right), \left(\max_j v_{ij} \mid i \in I'' \right) \right\},$$
 Ec. 2.8

donde I' está asociado con el criterio de beneficio, y I'' está asociado con el criterio de costo.

4. Calcule las medidas de separación, utilizando la distancia euclidiana n-dimensional. La separación de cada alternativa de la solución ideal se da como

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}, \quad j = 1, \dots, J. \quad \text{Ec. 2.9}$$

Similarmente, la separación desde la solución negativa ideal se da como

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, \dots, J. \quad \text{Ec. 2.10}$$

5. Calcular la proximidad relativa a la solución ideal. La proximidad relativa de la alternativa a_j con respecto a A^* se define como

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{(D_j^* + D_j^-)}, \quad j = 1, \dots, J. \quad \text{Ec. 2.11}$$

6. Clasifique el orden de preferencia.

2.4.4 Sistemas expertos de apoyo a la decisión (SEAD)

Actualmente, los sistemas expertos (SEs) están teniendo un auge muy importante para abordar problemas ambientales, es por lo anterior que Chen et al., (2008) propusieron el uso de estos sistemas basados en IA. Un sistema experto transfiere la experiencia de un ser humano en un campo particular a la computadora, este conocimiento se almacena y los usuarios pueden usar la computadora para recibir consejos específicos (Liao, 2004). Muchos SEs se basan en lógica difusa (LD); la LD es una lógica especial de muchos valores que aborda el fenómeno de la vaguedad y el desarrollo de herramientas para modelar a través de los grados de verdad tomados de una escala ordenada. La utilidad de aplicar lógica difusa recae en que es altamente recomendable cuando se trata de modelar información imprecisa; y toma un papel importante en la capacidad humana para tomar decisiones racionales en un entorno de incertidumbre (Novák, 2006). El sistema de LD utiliza dos tipos de sistemas de inferencia difusa: el tipo Mamdani y el Sugeno. El sistema de inferencia difusa más común es el tipo Mamdani, y fue uno de los primeros sistemas de control creados utilizando la teoría de conjuntos difusos. Este sistema se basa en tres bloques:

-
1. Fusificación: los valores de todas las variables de entrada que vienen del exterior entran y se convierten en valores difusos (Ross, 2004).
 2. Mecanismo de inferencia: considera los niveles de membresía de las variables de entrada y se apoya en las reglas de inferencia, arroja una salida.
 3. Defusificación: hace que la salida del sistema difuso se pueda interpretar dando valores concretos (Reznik, 1997). El método de Defusificación es el centroide que determina el centro del área bajo la función de membresía combinada.

En la realidad se presentan situaciones, particularmente cuando intervienen consideraciones subjetivas, en las que resulta difícil determinar la pertenencia o no de un elemento a un conjunto. Por ejemplo:

- Números naturales mucho mayores que 100; parece claro que 101 no pertenece al conjunto, y que 10^{10} si, pero, ¿y 1000?
- Ríos largos.
- Personas jóvenes, ¿pertenezco yo a este conjunto?

Tales conjuntos pueden recibir el calificativo de borrosos para indicar que no existe un criterio que determine exactamente un límite entre la pertenencia y no pertenencia al conjunto, como establece la teoría clásica. Es decir, constituyen una clase cuyos bordes están definidos de forma vaga. La transición entre la pertenencia y no pertenencia no es abrupta, si no gradual (Martinsanz & Peñas, 2005).

En los conjuntos clásicos algo está incluido completamente en él o no lo está en absoluto. Esta situación puede describirse asignando un 1 a todos los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los no incluidos. A la función que asigna estos valores la denominaremos función de inclusión o pertenencia (membership function). La función de inclusión o pertenencia de un conjunto difuso consiste en un conjunto de pares ordenados, $F = \{(u, \mu_F(u)) / u \in U\}$ si la variable es discreta, o una función continúa si no lo es. Como ya se ha comentado, el valor de $\mu_F(u)$ indica el grado en que el valor u de la variable U está incluida en el concepto representado por la etiqueta F . A modo de ejemplo, para el conjunto de las personas se pueden definir subconjuntos borrosos en función a la edad. El subconjunto de los Adultos puede definirse, asignando una función de inclusión abrupta para el conjunto clásico Adulto = edad

entre 25 y 45. Definido en términos borrosos, la función de inclusión de este conjunto toma valor de 1 entre 30 y 40, 0 para los menores de 20 o para los mayores de 50, y valores intermedios entre 20 y 30 y entre 40 y 50.

Para la definición de las funciones de pertenencia se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, por coincidir con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más frecuentes son la función de tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial y tipo π , a continuación en la siguiente Figura 2.6 se observan las funciones (Martín del Brío & Molina, 2001).

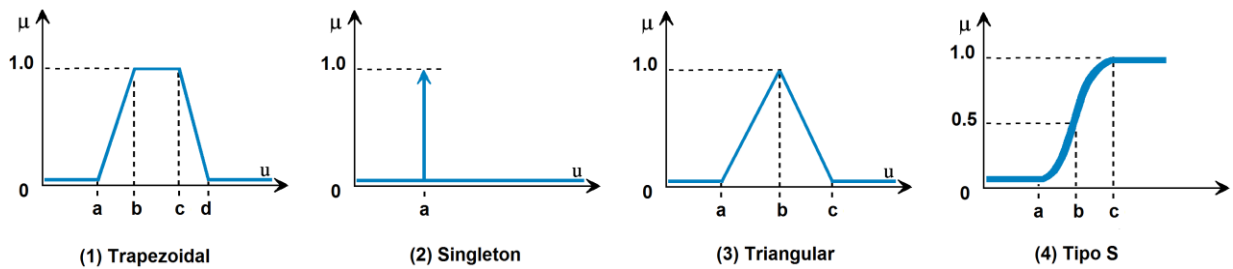


Figura 2.6 Tipos de funciones de pertenencia.

La función de tipo trapezoidal, se define por cuatro puntos a, b, c, d . Esta función es cero para valores menores de a y mayores de d , vale uno entre b y c , y toma valores en $[0, 1]$ entre a y b , y entre c y d . Se utiliza habitualmente en sistemas borrosos sencillos, pues permite definir un conjunto borroso con pocos datos, y sistemas basados en microprocesador, pues con similar formato pueden codificarse también funciones de tipo S, función de tipo π , triangular y singleton, según se distribuyan los puntos a, b, c , y d de la figura (por ejemplo, juntando b y c tenemos una triangular). En la siguiente ecuación se define una función trapezoidal:

$$\mu_{Trapezoidal}(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \left(\frac{u-a}{b-a}\right) & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ \left(\frac{d-u}{d-c}\right) & c \leq u \leq d \\ 0 & u > d \end{cases} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Esta función resulta adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores (adulto, normal, adecuada...). Para modelar una función triangular se hace $b=c$, para una

función de tipo S (pero no suave) se hace $c = d = \max(U)$, y para una función de tipo singleton $a=b=c=d$.

La función tipo singleton tiene valor de 1 sólo para un punto a y 0 para el resto. Se utiliza habitualmente en sistemas borrosos simples para definir los conjuntos borrosos de las particiones de las variables de salida, pues permite simplificar los cálculos y requiere menos memoria para almacenar la base de reglas. Se define como:

$$\mu_{Singleton}(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 1 & u = a \\ 0 & u \neq a \end{cases} \quad \text{Ec. 2.13}$$

La función triangular es definida mediante el límite inferior a , el superior b y el valor modal m , tal que $a < m < b$. La función no tiene porqué ser simétrica.

$$\mu_{Triangular}(u; a, m, b) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \left(\frac{u-a}{m-a}\right) & a \leq u \leq m \\ \left(\frac{b-u}{b-m}\right) & m \leq u \leq b \\ 0 & u > b \end{cases} \quad \text{Ec. 2.14}$$

La función tipo S es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero para un rango de valores estrecho en torno a un punto b ; puede definirse como:

$$\mu_{Tipo S}(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{1}{2} \left(\frac{u-a}{b-a}\right)^2 & a \leq u \leq b \\ \frac{1}{2} \left(\frac{b-u}{b-a}\right)^2 & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Esta función resulta adecuada para modelar propiedades como grande, mucho, positivo... Se caracteriza por tener un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores por encima de cierto punto a , siendo 0 por debajo de a y 1 para valores mayores de c . Su punto de cruce (valor 0.5) es $b=(a+c)/2$; y entre los puntos a y c es de tipo cuadrático (suave) (Martín del Brío & Molina, 2001).

Se denomina variable lingüística a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como mucho, poco, positivo, negativo, etc., que son las palabras que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto borroso. Aunque el objetivo principal de este concepto es expresar de manera formal el hecho de que pueden asignarse como valor de una variable palabras tomadas del lenguaje natural, no obstante a una variable lingüística podrán asignarse también valores numéricos. Así, en una expresión como la temperatura es fría, la variable temperatura debe ser entendida como una variable lingüística, pues se le asigna como valor el conjunto borroso fría, pero además esta variable puede también tomar valores numéricos como la temperatura es 4°C.

En términos más formales, una variable lingüística se define por una dupla $(A, T(A), U, G, M)$, donde A es el nombre de la variable, $T(A)$ es el conjunto de términos que nombran los valores x que puede tomar A , valores que son conjuntos borrosos en U ; el conjunto de valores numéricos que puede tomar para una variable discreta, o el rango de valores posibles para una continua, es lo que se conoce como el universo de discurso de la variable x , y se nombra como U ; por último, G es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de x , y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor (Martín del Brío & Molina, 2001).

2.5 Conclusiones

En este capítulo se describieron los conceptos básicos del ACV, como se aplica y cuáles son sus limitaciones y sus alcances como metodología de aplicación. Por otra parte también se incluye una descripción de todas las etapas de la industria azucarera (agricultura, transporte de caña, fábrica y cogeneración de electricidad a partir del bagazo) en donde se corrobora que esta industria requiere de una administración de sus recursos más eficiente para mejorar la huella ecológica que ha dejado. También se explican las herramientas como SMC para tratar la incertidumbre en el modelo, y las técnicas de inteligencia artificial (algoritmos genéticos y lógica difusa), sus ventajas y desventajas al aplicarlas en problemas ambientales.

Capítulo III

Estado del arte

Resumen

En este capítulo, la revisión de la literatura reúne información de artículos científicos en donde se ha aplicado ACV y también en donde las técnicas de IA se han aplicado como apoyo al ACV. La primera sección comprende artículos del ACV aplicado en todas las etapas de la industria azucarera. En la segunda sección, se analizan trabajos de las técnicas de IA como RNA, LD y AG con un enfoque de integración al ACV.

3.1 Estado del arte del ACV en la industria azucarera

Los límites del sistema en el estado del arte del ACV de caña de azúcar, comienzan con la fabricación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas, y terminan con la producción de azúcar de caña en sus diferentes presentaciones. En otros casos, los límites del sistema incluyen la generación de electricidad y la producción de etanol a partir de dos subproductos principales, como el bagazo y la melaza, respectivamente. En otros trabajos científicos, la aplicación del ACV se ha realizado en subproductos como la melaza para la alimentación animal, el uso de etanol como combustible, el uso de aguas residuales, la torta de filtración y las cenizas para la producción de biogás. En la Figura 3.1, se observan el sistema producto completo y los subsistemas que se analizarán en esta revisión de la literatura; las líneas continuas representan las etapas más importantes de la producción de azúcar de caña y las líneas punteadas representan los subproductos, subprocesos y desechos de la cadena de suministro.

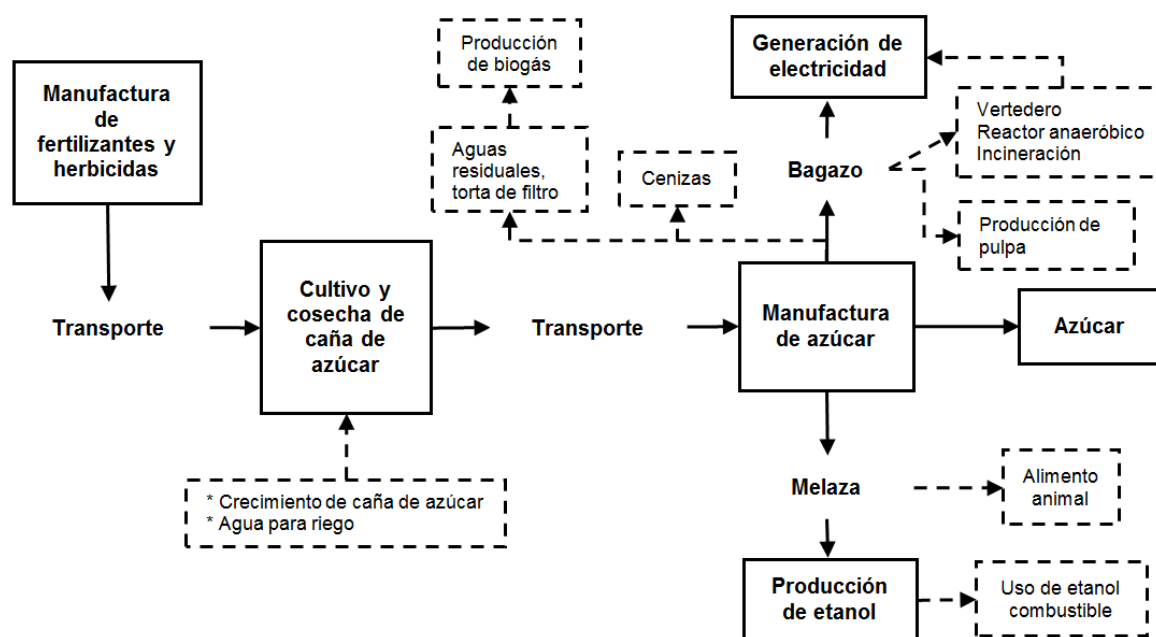


Figura 3.1 Límites del Sistema producto de la producción de caña y azúcar.

Para identificar las emisiones generadas en la industria de la caña de azúcar se emplea el estudio de ACV; en las Tablas 3.1 – 3.5, se presenta una revisión del estado del arte aplicando ACV en la industria de la caña de azúcar del año 2004 al año 2014; en cada tabla, se muestran

específicamente las etapas donde se evaluaron los impactos, así también el objetivo y la contribución de cada trabajo.

Los trabajos en la Tabla 3.1 muestran un análisis desde el cultivo hasta la disposición final del azúcar de caña. En esta evaluación los trabajos cubren al menos tres etapas importantes: el cultivo, transporte y producción de la azúcar; así también en las investigaciones de Ramjeawon (2004), Mashoko et al., (2010) y Lestari et al., (2013) se lleva a cabo un análisis de la cogeneración de electricidad a partir del bagazo; únicamente en el último trabajo se especifica que se utilizó la metodología Eco-indicador 99 para evaluar impactos y el Software SimaPro, en los 3 trabajos restantes no se identifican los detalles en este aspecto.

Tabla 3.1 ACV del cultivo hasta la disposición final como azúcar estándar.

Primer autor	Objetivo (s)	Contribución
Ramjeawon (2004)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Examinar todo el ciclo de vida de la caña de azúcar e identificar los estados con los impactos ambientales más graves. 2) Establecer un análisis de inventario de materias primas, flujos de energía y salidas de desechos para la cadena de producción de azúcar de caña. 3) Recomendar respuestas para un sistema sostenible. 	<p>Aplicación de ACV en las etapas de cosecha, producción y generación de energía. Los resultados más importantes muestran que el cultivo y la cosecha de caña representan el mayor impacto ambiental (44%), seguido de la fabricación de fertilizantes y herbicidas (22%), las siguientes etapas no son significativas. El consumo de energía primaria por UF es de 1995 MJ y 233 kg de CO₂ equivalente en el calentamiento global.</p>
	UF: Una ton azúcar cruda exportada.	
Mashoko, Mbohwa, & Thomas (2010)	<p>Cuantificar el consumo de recursos y la energía obtenida, para identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental.</p> <p>UF: Una ton azúcar en bruto producida con la tecnología actual de Sudáfrica. Se utilizó la metodología Eco-indicador 99 y el software SimaPro.</p>	<p>ACV en las etapas de cultivo, cosecha, producción y cogeneración eléctrica a partir de bagazo. En este estudio se demuestra que el mayor contribuyente al consumo de combustibles fósiles no renovables es el transporte por carretera. El 34% del consumo de energía fósil se debe al cultivo de la caña de azúcar. El consumo total de energía fósil por tonelada de caña para este estudio es de 5,350 MJ. El 74% de la contribución al impacto del calentamiento global se debe a las actividades de cultivo y cosecha de la caña de azúcar.</p>

Tabla 3.1 Continuación

Primer autor	Objetivo (s)	Contribución
Renouf & Wegener (2007)	Comparar el perfil ambiental de la caña de azúcar con otros tipos de cultivos cuantificando los impactos ambientales e identificando qué factores contribuyen al proceso de producción. UF: La solución de azúcar que contiene una ton de monosacárido equivalente.	En el aporte energético, los aspectos que más contribuyen son la electricidad para el riego (41%), la producción de fertilizantes (26%) y el uso de combustible para tractores y cosechadoras de la granja (22%). En las emisiones de gases de efecto invernadero, están representadas por: las emisiones de óxido nitroso (N ₂ O) a partir del suelo (59%), la electricidad para riego (20%), las emisiones de transporte/maquinaria (9%). En el potencial de eutrofización en la calidad del agua, las emisiones de nitrógeno y fósforo de los campos de caña de azúcar representan en conjunto el 60%, la otra fuente es la molienda (25%). Alrededor del 60% de la cosecha de caña de azúcar en Australia está irrigada.
Lestari et al. (2013)	Evaluar los impactos ambientales que se producen durante el ciclo de vida de la industria de la caña de azúcar e identificar los procesos o actividades más importantes que contribuyen al medio ambiente. FU: Una ton azúcar. Se utilizó la metodología Eco-indicador 99 y el software SimaPro 7.3.3.	ACV aplicado desde la etapa agrícola a la industrial. Los resultados muestran que la emisión total de la producción de caña de azúcar es de 508 Pt/ton azúcar. Los carcinógenos contribuyen con las emisiones más altas (291 Pt/1 ton azúcar) seguidos de la categoría de uso de la tierra (135 Pt /1 ton azúcar). La etapa agrícola contribuye al mayor impacto ambiental de todo el proceso (86%), seguida de la etapa industrial (8.4%) y finalmente el transporte (5.6%).

En la Tabla 3.2 se describen dos trabajos desde el cultivo hasta la cosecha de la caña de azúcar. En el trabajo de M.A Renouf, Wegener, & Pagan, (2010) se incluye un análisis de incertidumbre para los datos de producción. Este análisis apoya el proceso de toma de decisiones en el estudio, además incluye el uso de las directrices del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), la metodología IMPACT 2002+ para evaluar impactos y el Software SimaPro. Van der Laan et al., (2012) propone el uso de DSSAT Software como herramienta de apoyo para simular el crecimiento de la caña y la utilización de agua, además del uso de otras metodologías tradicionales para la EICV.

Tabla 3.2 ACV del cultivo a la cosecha de la caña de azúcar.

Primer autor	Objetivo (s)	Contribución
M.A Renouf et al., (2010)	Generar un conjunto robusto de datos de ACV para el crecimiento de caña de azúcar que podría utilizarse en futuras evaluaciones de la caña de azúcar australiana. UF: 1 ton caña de azúcar entregada al molino. Se utilizó Impact 2002+, la metodología IPCC, la SMC y el software SimaPro 7.1.	Se llevó a cabo un análisis de incertidumbre utilizando la Simulación Monte Carlo (SMC) para evaluar la variabilidad. Los insumos de energía no renovable en el promedio estatal contribuyen con 536.8 MJ primarios, las etapas con mayor consumo de energía fueron la producción de fertilizantes, el uso de combustible en maquinaria y la electricidad para el riego. La categoría de calentamiento global aportó 114.5 kg de CO ₂ eq, la eutrofización (0.39 kg PO ₄ eq), la acidificación acuática (0.83 kg SO ₂ eq) y la acidificación terrestre (5.28 kg SO ₂ eq). Las categorías como el uso del agua y el uso de la tierra también fueron importantes en este trabajo científico.
Van der Laan, Jumman, Tweddle, Wettergreen, & Antwerpen (2012)	Utilizar menos agua de riego mediante una programación de riego más precisa en función de la demanda de los cultivos, manteniendo o incluso aumentando los rendimientos actuales reduciendo el agua y otros. FU: 1 ton caña. Se utilizó la metodología Eco-indicador 95, la IPCC 2006 y el software DSSAT Canegro.	Los resultados más importantes del escenario de referencia muestran lo siguiente: el aporte de energía fue de 257 MJ (la mayor contribución es para la fabricación de urea con un 34%). Las emisiones totales de gases de efecto invernadero fueron 70.3 kg CO ₂ eq. Finalmente, el potencial de acidificación se estimó en 1.2 g de SO ₂ eq. El consumo de agua fue de 100.4 m ³ . Al mostrar los resultados del escenario simulado, se observa que los resultados reducen notablemente su impacto.

En la Tabla 3.3 se describen diferentes trabajos que se centran en la administración eficiente del bagazo y la cogeneración de energía a partir del bagazo. En estos trabajos, los impactos ambientales se producen principalmente por la quema ineficiente del bagazo, y por utilizar en diferentes procesos la biomasa para manufacturar otros productos.

Tabla 3.3 ACV en la administración del bagazo y la cogeneración de electricidad.

Primer autor	Objetivo (s)	Contribución
Lopes, Delai, Montes, & Ometto, (2014)	Identificar y cuantificar los impactos ambientales potenciales del sistema de generación de electricidad a partir de bagazo para identificar sus principales oportunidades de mejora. FU: Superávit de generación eléctrica de 1 MWh y Transmisión y distribución de electricidad de 1 MWh km. Se utilizó el método EDIP y el software SimaPro.	LCA basado en tres estudios previos que abarcan los procesos de generación, transmisión y distribución de electricidad. Los resultados normalizados se expresan en personas equivalentes (PEw.EU). Se ha demostrado que es importante centrarse en abordar las emisiones de ozono fotoquímico (181.123 PEw.EU), toxicidad humana a través del suelo (105.042 PEw.EU) y enriquecimiento de nutrientes Nitrogenados (95.208 PEw.EU.) de la cosecha de caña de azúcar y los procesos de aplicación química.
L Mashoko, Mbohwa, & Thomas, (2013)	1) Determinar la contribución de los diferentes procesos al ciclo de vida completo de la producción de electricidad. 2) Comparar el ICV ambiental de la electricidad derivada de bagazo en Sudáfrica. 3) Identificar las oportunidades para mejorar el desempeño ambiental. UF: 1 GWh de electricidad derivada de bagazo. Se utilizó el software SimaPro.	Los resultados muestran que se producen menos kg de CO ₂ eq (67,000), cantidades más bajas de MJ (472,000), SO ₂ y NO ₂ en comparación con otros estudios importantes. Por lo tanto, la ganancia de energía neta para la electricidad a partir del bagazo por GWh es considerablemente mejor que la de la electricidad producida a partir de carbón. En conclusión, se muestra que la mayoría de las emisiones ambientales se producen durante la quema de carbón en los ingenios azucareros.
Gil, Moya, & Domínguez, (2013)	Evaluar y comparar los impactos ambientales del ciclo de vida de diferentes tecnologías de cogeneración utilizadas actualmente en la industria azucarera cubana. UF: La electricidad generada diariamente (1,000 kWh). Se utilizó la metodología Eco-indicador 99 y el software SimaPro.	Es estudio combina nueve modelos de generadores de vapor con ocho turbogeneradores (un total de 72 alternativas). Los resultados mostraron que la reducción de las emisiones al aire, agua y suelo tuvo un efecto favorable en las categorías de carcinogénesis, radiación, ecotoxicidad y uso de la tierra. La categoría de daños a la salud humana alcanzó mayores impactos en la etapa de cogeneración, lo que representó aproximadamente el 80% del impacto ambiental total del proceso.
Melamu & Blottnitz, (2011)	Rastrear y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con el desvío del bagazo del ingenio azucarero a la producción de bioetanol celulósico cuando se utilizan combustibles fósiles para reemplazar el bagazo. UF: El servicio de energía prestado por el bagazo de caña de azúcar que surge del procesamiento de caña de azúcar cosechada de una hectárea de tierra por año en Sudáfrica. Se utilizó el método Impact 2002+ y SimaPro 7.1.2.	En este estudio, el ACV se aplica a siete escenarios. Los hallazgos muestran que desviar el bagazo sin mejoras de eficiencia de su uso actual a una biorrefinería de etanol podría ser contraproducente para todos los impactos ambientales estudiados. Se puede observar que el escenario de caso base tiene el mejor desempeño que los otros escenarios en las cuatro categorías de impacto estudiadas. El escenario donde se desvía el 100% del bagazo tiene el peor desempeño.

Tabla 3.3 Continuación

Primer autor	Objetivo (s)	Contribución
Botha & von Blottnitz, (2006)	<p>Comparar el desempeño ambiental proyectado de dos productos bioenergéticos derivados del bagazo y con la práctica actual.</p> <p>UF: Utilización de recursos provenientes de 1 ha de tierras cultivadas. Se utilizó CML, IPCC, Eco-indicador 95 y TEAM®.</p>	<p>ACV que compara los beneficios ambientales de la electricidad cogenerada y el combustible de etanol producido a partir de bagazo. En Bioetanol, los resultados mostraron que el agotamiento de los recursos no renovables (-2.4E-12 frac. De reserva), la toxicidad humana (4,105 g), la ecotoxicidad terrestre (-8.93E-03 t) y el Eco-indicador 95 (- 27,745 milipuntos) tuvo la menor contribución que la electricidad verde y el caso base. En la electricidad verde, la acidificación del aire, la eutrofización y el efecto invernadero a partir del IPCC tuvieron una menor contribución que el caso base y el bioetanol. La cogeneración de recursos reduce las emisiones relacionadas con la energía, mientras que el combustible de etanol se prefiere en términos de conservación de recursos.</p>
Toolseeram Ramjeawon, (2008)	<ol style="list-style-type: none">1) Desarrollar un perfil ambiental de la electricidad a partir de bagazo.2) Comparar el desempeño ambiental con otros sistemas.3) Identificar oportunidades para reducir impactos/eficiencia a lo largo del ciclo de vida.4) Desarrollar el perfil ambiental para el mix eléctrico. <p>UF: 1 GWh de electricidad exportada a la red eléctrica nacional. Se utilizaron los programas CML World 1992, Eco-indicador 99 y SimaPro.</p>	<p>Los resultados de este estudio son los siguientes: la electricidad derivada del bagazo proporciona beneficios ambientales para las categorías de emisiones de gases de efecto invernadero (35,600 kg CO₂ eq), toxicidad humana (449 HC), acidificación (356 kg AP), insumo de energía no renovable (261,000 MJ LHV), y smog de verano (23.8 kg POCP). Sin embargo, se desempeña mal en relación con el consumo de agua dulce y la eutrofización. La electricidad derivada del bagazo proporciona beneficios ambientales en comparación con la electricidad derivada del carbón y el combustible.</p>
Kiatkittipong, Wongsuchoto, & Pavaasant, (2009)	<p>Identificar la opción de gestión de bagazo más atractiva con el mejor desempeño ambiental utilizando conceptos de ciclo de vida.</p> <p>UF: 1 ton bagazo. Se utilizó EDIP / UMIP 97 V2.</p>	<p>Los resultados indican que el bagazo es ideal como materia prima en la planta de celulosa, ya que los impactos de esta opción fueron los más pequeños; las cargas ambientales fueron menores que las de la planta de celulosa de eucalipto convencional. El relleno sanitario fue la peor opción porque genera grandes emisiones de CH₄ y NH₃, lo que provoca aumentos en el calentamiento global y el smog fotoquímico. El relleno sanitario para la producción de electricidad con la eficiencia de la recolección de metano genera menos impactos ambientales que una planta de energía mixta convencional.</p>

En la Tabla 3.4 se describe el uso y producción de etanol proveniente de la caña de azúcar. En este análisis se evalúan las cargas ambientales con herramientas tradicionales del ACV como el método EDIP y el uso de software comercial para el ACV.

Tabla 3.4 ACV y la producción y uso de combustible etanol.

Primer autor	Objetivo	Contribución
García et al., (2011)	Determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los balances de energía basados en datos de campo para permitir una mejor evaluación de las ramificaciones ambientales y energéticas de la producción de etanol en México. UF: kg CO ₂ eq/GJ etanol en equivalencia a lo establecido por la European Renewable Energy Directive (RED).	Las emisiones de GEI y los balances de energía fósil se calcularon con un modelo creado por el Institute for Energy and Environment Heidelberg (IFEU). Todas las modalidades mexicanas lograron emisiones superiores al caso brasileño (27.5 kg CO ₂ eq/GJ etanol). La modalidad mexicana con la proporción más alta de energía renovable/fósil fue el etanol del jugo de la caña de azúcar que genera electricidad excedente con 4.8 GJ de etanol/GJ fósil.
Nguyen & Gheewala (2008)	Realizar un análisis del desempeño ambiental y energético del ciclo de vida del etanol a base de melaza como una mezcla del 10% con gasolina como combustible de transporte en Tailandia. UF: 1 litro de gasolina equivalente, consumido por un nuevo vehículo de pasajeros para recorrer una distancia específica. Se usó el método GREET.	Los resultados indican que el etanol a base de melaza (MoE) en forma de mezcla del 10% con gasolina (E10), consume menos energía fósil (5.3%), menos petróleo (8.1%) y proporciona un impacto similar en la acidificación en comparación con la gasolina convencional. Sin embargo, la mezcla de combustible tiene un rendimiento inferior en otras categorías.
Ometto, Zwicky Hauschild, & Lopes Roma (2009)	Evaluar los impactos ambientales, de acuerdo al diseño de la actividad de enfoque de ciclo de vida basado en el combustible de etanol de la caña de azúcar, causando impactos importantes. UF: 10,000 km manejados en un área urbana con un automóvil de un motor 1.600 cm ³ que funciona con combustible de etanol hidratado. Se utilizó el método EDIP y el software SimaPro.	Existe una producción neta de 22,198.77 MJ/t de alcohol sin considerar el consumo de energía eléctrica directa del sistema analizado. El uso de etanol como combustible al 100% para automóviles conduce principalmente a las emisiones de NO _x . Las sustancias emitidas a la atmósfera en las cantidades más grandes son CO ₂ , N _x O _y , CH ₄ y CO. Las emisiones al agua se deben a la producción de diésel y los desechos de la producción de fertilizantes de fosfato.
Seabra, Macedo, Chum, Faroni, & Sarto, (2011)	Evaluar el uso de la energía del ciclo de vida y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la caña de azúcar y el etanol, teniendo en cuenta el exceso de bagazo y la electricidad como co-productos. UF: 1 ton azúcar de caña. El modelo 1.8c.0 GREET se utilizó para evaluar el uso de energía y las emisiones de GEI; también se utilizó la SMC.	El uso de energía fósil y las emisiones de GEI para la producción de azúcar se estimaron en 721 KJ/kg y 234g de CO ₂ eq/kg respectivamente. En cuanto al etanol anhidro, las emisiones del ciclo de vida se evaluaron en 80 kJ/MJ y 21.3 g de CO ₂ eq/MJ. Se prestó especial atención a la variación de algunos parámetros entre las unidades de producción en función de los datos recopilados por la industria.

En la Tabla 3.5, se presentan dos estudios con un enfoque hacia los productos y subproductos que se generan a partir del uso de la caña de azúcar. Ambos utilizan métodos tradicionales como IPCC 2003, Eco-indicador 99, IMPACT 2002+ y software de uso comercial como SimaPro. El trabajo de Renouf et al., (2011) presenta un enfoque integrado con análisis de incertidumbre que puede apoyar en la toma de decisiones.

Tabla 3.5 ACV para productos y subproductos de la caña de azúcar.

Primer autor	Objetivo	Contribución
Contreras et al., (2009)	Identificar y cuantificar los aspectos que tienen el mayor impacto ambiental de cuatro alternativas para el uso de subproductos y desechos del proceso de azúcar de caña y sugerir mejoras en los sistemas. UF: 216 ton por día de azúcar de caña. Se utilizó el método Eco-indicador 99 y el Software: SimaPro 6.0	En la categoría de salud humana los impactos varían entre 31.8 y 32.6 kilo points, en la calidad del ecosistema varían entre 35.4 y 36.5 kilo points. Sin embargo, la principal diferencia se encuentra en la categoría de impacto de recursos. Los puntos medios con mayor contribución son el uso de la tierra y los efectos respiratorios de los compuestos inorgánicos. La Alternativa IV que integra los procesos de azúcar con la producción de alcohol y biogás muestra los mejores resultados.
Renouf, Pagan, & Wegener (2011)	Generar resultados del ACV para los productos australianos de caña de azúcar: azúcar en bruto, melazas (utilizadas como alimento para animales), electricidad (de la combustión del exceso de bagazo) y etanol combustible anhidro (de la fermentación de las melazas). UF: 1 ton azúcar en bruto, 1 ton melaza, 1 kWh de electricidad, 1 MJ de etanol combustible anhidro. El método: utilizado fue IMPACT 2002+ y las directrices del IPCC. El Software usado fue SimaPro y SMC.	La SMC se utiliza para analizar el crecimiento de la caña de azúcar. En el GWP, las mayores emisiones (kg CO ₂ /t) provienen de la producción de azúcar en bruto (modelos 1, 2 y 3) y los modelos de producción de melaza. En los MJ primary, se observa que el modelo 1 de la producción de azúcar en bruto tiene la mayor contribución. Finalmente, los modelos para la melaza, la electricidad y el etanol tienen un menor impacto ambiental en comparación con los tres modelos del azúcar en bruto. Sin embargo, los modelos de melaza también producen impactos ambientales que deben ser monitoreados.

La industria azucarera produce grandes cantidades de sustancias contaminantes que se van al aire, al agua y al suelo. Los trabajos de investigación analizados evalúan los impactos ambientales en toda la cadena de suministro. Sin embargo, también es posible encontrar trabajos relacionados con los productos y subproductos de la caña de azúcar, que en la mayoría de los casos funcionan como recursos de entrada para otros procesos. El ACV del

azúcar de caña se centra en encontrar las etapas con un impacto ambiental más significativo. También busca cuantificar el consumo de los recursos utilizados y comparar el cultivo de la caña de azúcar con otros. En la mayoría de los trabajos de investigación está claro que la etapa agrícola es la que tiene el mayor impacto ambiental en la producción de azúcar. En el ACV para el cultivo y la recolección de la caña se identifican las variables que contribuyen a las altas cargas ambientales (uso de fertilizantes, herbicidas, etc.) y los puntos medios con mayor impacto son el calentamiento global (kg CO₂ eq) y el consumo total de energía fósil (MJ primary). Además, se destaca en el consumo de agua para riego y la forma de evitar su uso indiscriminado.

En un ingenio azucarero no solo se produce azúcar, sino que también se produce electricidad a partir del bagazo; el bagazo se puede utilizar para la producción de celulosa o cogeneración de electricidad en diferentes formas. Una práctica muy común es la cogeneración de electricidad a partir de la combustión del bagazo, a pesar de ser una práctica sostenible genera graves cargas ambientales. La contribución de los trabajos de la Tabla 3.5 indican que se generan impactos ambientales significativos cuando la electricidad se produce a partir del carbón o combustibles fósiles; lo más apropiado es producir electricidad a partir de bagazo, además, este tipo de producción genera menos carga ambiental que producir bioetanol. Muchos de los trabajos científicos analizados anteriormente pretenden estimar los impactos ambientales, en comparar el desempeño ambiental de este sistema con otros, en proponer cuál es la mejor opción de sistema para producir electricidad y, en casos más específicos, tratar de cuantificar las emisiones de GEI.

La melaza se puede utilizar como alimento para el ganado, pero a menudo se utiliza para la producción de etanol. El etanol a base de melaza genera menos impactos ambientales que el combustible fósil. Los impactos más frecuentes en esta etapa son los gases de efecto invernadero, y cuando el etanol se utiliza como único combustible, conduce principalmente a las emisiones de NO_x. El análisis de la literatura del ACV en la producción de etanol, demostró que la evaluación ambiental de este combustible genera principalmente emisiones de GEI, estos trabajos tienen el propósito de identificar la contribución de los diferentes impactos

ambientales y también llevan a la comparación ambiental entre el uso de etanol combustible y la gasolina convencional.

Finalmente, otros trabajos científicos se enfocan en los subproductos, como las cenizas, o el uso de torta de filtración y aguas residuales para la producción de biogás. El análisis del ACV en los subproductos también muestra que los esfuerzos para aplicar el ACV en algunas etapas de la producción de azúcar de caña se centran más en productos como el bagazo y la melaza, las aplicaciones están limitadas en otros aspectos, por ejemplo, en la producción de azúcar en bruto y el ACV relacionado con la etapa agrícola. Lo descrito en los párrafos anteriores ha determinado las mejores estrategias para minimizar los impactos ambientales de su evaluación con ACV obteniendo ahorros considerables en el consumo de recursos, lo que se traduce en menores costos. Esto es posible a través del establecimiento adecuado de las bases y los objetivos del estudio (de acuerdo con ISO 14040) y la participación de todas las partes interesadas.

3.2 Estado del arte de la integración de técnicas de IA en el ACV

En este punto se presenta un análisis del estado del arte de diferentes etapas del ACV donde es apoyado por técnicas de IA. Este análisis de enfoque integrado cubre tres herramientas básicas de IA como son: Lógica Difusa (LD), Redes Neuronales Artificiales (RNAs) y Algoritmos Genéticos (AGs). El análisis se describe en las Tablas 3.6 – 3.8. Esta revisión del estado del arte cubre del año 1999 al año 2015.

En este análisis de la literatura se evalúan las siguientes etapas: Optimización de impactos ambientales con AGs, tratamiento de incertidumbre y subjetividad en el ICV, y la EICV con LD y RNAs. En la Tabla 3.6, se describen aquellos estudios que integran los AGs al ACV; este enfoque integrado tiene como objetivo la minimización de aspectos ambientales en diferentes procesos o productos, como es el caso de los procesos químicos, el uso del tereftalato de polietileno (PET), el beneficio ambiental que tiene el uso de celdas fotovoltaicas (FV) y el diseño de edificios verdes. En este tipo de estudios se requiere de un modelo matemático que incorpore funciones objetivo (FO) y restricciones; algunos ejemplos de FO presentes en este análisis son: la minimización del costo normal de energía y las emisiones de

carbono. Después de haber modelado matemáticamente el problema, el siguiente paso es la utilización de algún software especializado para desarrollar la optimización.

Es a través de este tipo de estudios con enfoque integrado, que el ACV se puede robustecer en algunas de sus etapas, como en este caso la minimización de la huella ambiental; es decir la aplicación de un ACV no solo se limitará a la estimación de impactos ambientales, si no que permitirá reducir ciertos impactos encontrados en este estudio en particular.

Tabla 3.6 Optimización de impactos ambientales con AG.

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Komly et al., (2012)	<p>Evaluar los impactos ambientales del sistema de administración de desperdicios del PET, y proponer herramientas apropiadas que determinen como podría ser minimizada la huella ambiental.</p> <p>Se utilizó un enfoque multicriterio y la herramienta TOPSIS</p>	<p>El modelo matemático consiste en encontrar los valores que minimizan los impactos ambientales de las botellas de PET. Los resultados muestran que la tasa de recolección óptima varía entre 80 y 90% dependiendo del número de viajes de reciclaje posibles, que es en promedio un 10% más alto que los valores objetivo establecidos para 2019 en Francia. En este estudio, se demostró que el uso de un algoritmo genético para la asignación óptima de botellas entre la ruta de valorización es un método eficiente.</p>
Morales-Mendoza (2013)	<p>Desarrollar una estrategia metodológica y genérica para el eco-diseño de procesos químicos utilizando herramientas tradicionales de modelado y de simulación (HYSYS, COCO, ProSim Plus et Ariane), de ACV, de optimización multiobjetivo (AG) y métodos de ayuda a la decisión (ELECTRE, PROMETHEE, MTOPSIS).</p>	<p>Modelo de optimización multiobjetivo. El resultado obtenido por M-TOPSIS muestra la mejor solución porque mantiene un equilibrio entre todos los criterios. La solución con MTOPSIS confirma que las emisiones de dióxido de carbono y óxido de nitrógeno, además de la materia prima de metanol, tienen una mayor contribución ambiental que otras.</p>
Khoshnevisan, Bolandnazar, Shamshirband, Shariati, et al., (2015a)	<p>Evaluar el resultado de la utilización simultánea del ACV con AG o análisis envolvente de datos sobre el impacto ambiental de los sistemas agrícolas.</p> <p>En este estudio se combina el ACV con un AG multiobjetivo y el análisis envolvente de datos.</p>	<p>Se evalúan tres categorías de impacto en el caso de estudio: el calentamiento global (CG), la respiración inorgánica (RI) y el uso de energía no renovable (ENR). Los resultados muestran que las tres categorías obtuvieron 10.3 kg PM2.5 eq ha, 9,485.5 kg CO₂ eq ha, y 186,432 MJ primary energy ha respectivamente. Los resultados del algoritmo genético multiobjetivo (OMAG) LCA + OMAG mostraron que hay una reducción del 27% en RI, y del 35% en CG y ENR si se utiliza una combinación adecuada de recursos.</p>

Tabla 3.6 Continuación

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Perez-Gallardo, Azzaro-Pantel, Astier, Domenech, & Aguilar-Lasserre (2014)	Desarrollo de una metodología general para el diseño de sistemas FV basados en los principios del eco diseño considerando de manera simultánea los aspectos técnico-económicos y ambientales. Con el fin de evaluar el desempeño ambiental de los sistemas FV, el ACV fue utilizado.	La optimización multiobjetivo consistió en generar alternativas óptimas de configuración de celdas fotovoltaicas. Los resultados muestran que los módulos fotovoltaicos basados en silicio monocristalino generan la energía de salida máxima (430,397 kWh anuales). Sin embargo, su tiempo de recuperación de la energía es alto debido a la cantidad de energía requerida durante la fase de fabricación. Después de la optimización, se realiza una evaluación ponderada para 15 objetivos. La configuración con silicio monocristalino tiene un mejor rendimiento. La configuración con diselenuro de indio y cobre y telururo de cadmio tiene la mejor compensación en ambos casos.
Wang, Zmeureanu, & Rivard (2005)	Identificar las soluciones de Pareto para ayudar a los diseñadores a tomar decisiones rentables para el diseño de edificios ecológicos.	Los resultados muestran que el costo mínimo del ciclo de vida fue de \$ 356,900 y el costo después de la optimización fue de \$335,200. El valor de impacto del ciclo de vida inicial fue $4.612 \cdot 10^7$ MJ, y luego de la optimización fue de $3.819 \cdot 10^7$ MJ. Los impactos ambientales del ciclo de vida pueden reducirse en un 65% si la fuente de energía del petróleo cambia a hidroeléctrica y la contribución ambiental de la construcción disminuye de 90% a 70%.
Dufo-López et al., (2011)	Minimizar el costo normal de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO ₂) equivalente del ciclo de vida.	En esta investigación, se utiliza un algoritmo de optimización multiobjetivo en un sistema fotovoltaico eólico-diésel independiente con almacenamiento de batería. Económicamente y ambientalmente, el generador de gasolina no ofrece ninguna solución óptima; esto indica que es mejor usar un generador diésel de 2 kVA en lugar de un generador de gasolina de 0.5 o 1 kVA, incluso para perfiles de carga de baja potencia. Los resultados muestran que el generador fotovoltaico es la fuente de electricidad más importante para los sistemas autónomos, no solo ambientalmente sino también económicamente.

Así también, Morales-Mendoza et al (2014) propusieron minimizar (OMAG) los impactos en la producción de biodiesel. Kostin et al (2011); Kostin et al (2012) proponen la reducción del costo y el impacto ambiental en el ACV del bioetanol de caña. Finalmente, López-Andrés et al (2017) propusieron una OMAG que minimiza los impactos ambientales y considera un criterio económico en la producción de carne de pollo. En la Tabla 3.7, se analiza el tratamiento de la subjetividad inmersa en las etapas del ACV, esta subjetividad es tratada con LD. En muchos casos obtener un ICV y evaluar los impactos ambientales, etc., lleva inmerso subjetividad

inherente a los sistemas sobre todo porque se requiere de expertos en el área para realizar las estimaciones. Para tratar esta subjetividad, se proponen los sistemas expertos difusos (SEDs) basados en LD, estos sistemas permiten modelar esa subjetividad y tomar decisiones como las tomaría un experto en temas ambientales, solo requiere que el conocimiento en esa área específica se introduzca a la computadora y esta última puede tomar decisiones como lo haría el especialista en términos ambientales. En los trabajos descritos en la Tabla 3.7, se describe el uso de esta herramienta que permite obtener los impactos de forma más consistente y con tasas de éxito elevadas procesando los datos en condiciones de incertidumbre y subjetividad.

Tabla 3.7 Tratamiento de la subjetividad en el ACV con LD

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Benetto, Dujet, & Rousseaux, (2008)	Resaltar los beneficios potenciales de la integración de ACV con un método de análisis multiobjetivo basado en comparación por pares que incluye evaluaciones de incertidumbre.	En esta investigación, se propone incluir en el ACV un enfoque que consisten en utilizar la evaluación imprecisa y el método de entornos de decisión para tratar la incertidumbre. Los resultados muestran que si la clasificación de los escenarios no es consistente (los valores de ϕ_x y ϕ^* para cada escenario son similares o la clasificación varía con α), la consideración de las incertidumbres podría mejorar la confiabilidad de la interpretación.
González et al., (2002)	Difundir la metodología a situaciones de incertidumbre en los datos de entrada, aplicando LD durante la etapa de evaluación del ACV.	El ACV se aplica en un caso de estudio de una lámpara, apoyado por un SE que estima los impactos ambientales. Los resultados de esta investigación indican que el envasado es el principal contribuyente a las categorías de eutrofización, efecto invernadero y smog. Las emisiones al agua contribuyen a la eutrofización con 42.5 puntos en una escala de 0/100, y en la acidificación con 20.0 puntos en una escala de 0/100. La etapa de transporte contribuye al smog, a la toxicidad y al efecto invernadero.
Güereca, Agell, Gassó, & Baldasano (2007)	Establecer un nuevo método, que incluya la normalización y ponderación basada en la teoría de conjuntos difusos, permitiendo que la información pueda ser procesada en condiciones de incertidumbre y subjetividad.	El modelo consiste en la adquisición de indicadores parciales de impacto ambiental, un inventario de emisiones, así como objetivos políticos y límites de sostenibilidad. Los hallazgos muestran que la mejor alternativa para el manejo de residuos biológicos es 50-50 du, que incluye el uso directo de residuos biológicos no considerados en el análisis. La alternativa 100-0 es la peor; a pesar de considerar el tratamiento biológico para los residuos biológicos, genera los mayores impactos relacionados con el rendimiento de la recolección selectiva, las emisiones en el compostaje y el uso del agua en la biogásificación.

Tabla 3.7 Continuación

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Thiel, Seppel, Müller-Pieralla, & Richter (1999)	Desarrollar un modelo general para un enfoque integrado de la evaluación ambiental, donde ICV, el modelado del comportamiento ambiental y la EICV en conjunto puede ser utilizado como una herramienta para evaluar los impactos locales y regionales de emisiones liberadas a lo largo del ciclo de vida de los productos.	En esta investigación, se integran tres técnicas ambientales: un LCI, modelos de destino ambiental y una evaluación de impacto ecológico utilizando SEDs. Los resultados del SED para la acidificación muestran que el impacto siempre está por debajo de 0, lo que significa que la deposición de H ⁺ debido a las emisiones de NO _x causadas por la central eléctrica está por debajo de la capacidad de amortiguación del suelo. Finalmente, se puede ver que esta SED es útil como plantilla para la evaluación de los impactos ambientales locales y regionales.
Weckenmann & Schwan, (2001)	Apoyar un manejo fácil del ACV, especialmente el manejo de incertidumbre en los datos de inventario.	En esta investigación, se aplica un SED en la EICV para simular la forma de razonamiento de un experto ambiental. Los resultados muestran que los flujos dominantes son óxidos de nitrógeno resultantes de la producción de energía eléctrica, seguidos por el dióxido de azufre y el dióxido de carbono. Estas tres sustancias forman una proporción de aproximadamente el 60% de la incertidumbre del resultado final de todos juntos.

En la Tabla 3.8, se describe el uso de RNAs como apoyo al ACV en la estimación de impactos ambientales, las RNAs funciona con datos históricos y pueden llegar a hacer predicciones muy precisas cuando las herramientas tradicionales se encuentran limitadas, y son útiles específicamente, cuando los problemas son no lineales. Los enfoques utilizados en los tres estudios realizados permiten observar que las RNAs apoyan la evaluación de categorías de impacto y existen enfoques como el de Khoshnevisan, Rafiee, Omid, Mousazadeh, & Clark (2013) que incluyen un modelo neuro-difuso para estimar los impactos ambientales en la producción de pepino y tomate.

El uso de RNAs no solo se limita a la estimación de impactos ambientales, también pueden ser muy útiles para realizar predicciones de inventarios (Wernet, Hellweg, Fischer, Papadokonstantakis, & Hungerbühler, 2008) o para la EICV de alternativas de diseño de un producto, mejorando la eficiencia ambiental del mismo (Park & Seo, 2006).

Tabla 3.8 RNAs en la predicción de impactos ambientales y los datos del ICV.

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Ozbilen, Aydin, Dincer, & Rosen (2013)	Investigar los impactos ambientales de la producción de hidrógeno base nuclear a través de la división de agua termoquímica utilizando el ciclo CueCl mediante la realización de un ACV basado en redes neuronales.	Se propone una RNA para estimar los impactos de alteración de los parámetros de entrada de un sistema de producción de hidrógeno. El modelo tiene cuatro variables de entrada: capacidad de la planta de producción de hidrógeno, vida útil de la planta y entrada de calor y electricidad a la planta de hidrógeno, y tres variables de salida: CG, potencial de acidificación (PA) y eficiencia de la planta de hidrógeno. La RNA mejor evaluada se entrenó con 10 neuronas y mostró un $R^2 = 0.99991$. Este modelo funciona de manera eficiente y puede calcular de manera segura los impactos ambientales de la producción de hidrógeno termoquímico con base nuclear y la eficiencia de la planta.
Khoshnevisan, Rafiee, Omid, Mousazadeh, & Clark, (2013)	Evaluar los impactos ambientales de la producción de pepinos y tomates en invernadero y desarrollar modelos del sistema de inferencia neuro-difusa (ANFIS) para predecir indicadores de impacto ambiental basados en los insumos utilizados durante la temporada de producción.	Se seleccionaron diez categorías de impacto según el método de caracterización CML 2 baseline 2000 V2/world, 1990. Los resultados muestran que en las categorías de impacto normalizadas, la producción de tomate tiene un impacto ambiental menor que la producción de pepino. La contribución de los impactos en casi todas las categorías de impacto estuvo dominada por el gas natural, la electricidad y el nylon. El modelo ANFIS fue capaz de pronosticar los índices ambientales de la producción en invernaderos.
Khoshnevisan et al., (2014)	<ol style="list-style-type: none">1) Comparar el consumo de energía y las consecuencias ambientales relacionadas con las granjas de arroz tradicionales y consolidadas, para evaluar los efectos de utilizar un mayor uso de la energía mecánica.2) Disminuir las consecuencias ambientales negativas del cultivo del arroz, la aplicación de fertilizantes químicos.	Se realiza una comparación de dos tipos de granjas, GC (granja consolidada) y GT (granja tradicional) con ACV y ANFIS. Los resultados muestran que la GC consume 57 GJ en comparación con los 74.2 GJ consumidos por GT. Las relaciones de energía para los GC y los GT fueron 1.6 y 0.9, respectivamente. La electricidad genera el mayor impacto para ambos tipos de granjas, seguida por los fertilizantes químicos, fosfato y nitrógeno. El modelo basado en ANFIS se puede utilizar para predecir las cargas ambientales de la producción de arroz con alta precisión.

Tabla 3.8 Continuación

Autor (es)	Objetivo	Contribución
Khoshnevisan, Rafiee, Omid, Mousazadeh, & Sefeedpari, (2013)	El objetivo de este estudio fue la evaluación comparativa ambiental de la producción de papa en la finca en tres tamaños diferentes (<1 ha, 1-3 ha, > 3 ha) utilizando la metodología de ACV.	En este estudio, se utilizó una RNA para predecir los índices ambientales de la producción de papa en Irán. Las energías de entrada fueron elegidas como las entradas del modelo. Además, se seleccionaron seis categorías de impacto como resultados objetivo: CG, potencial de eutrofización (PE), potencial de toxicidad humana (PTH), potencial de ecotoxicidad terrestre (PEcoT), potencial de formación de oxidante (PFO) y PA. El mejor error cuadrático medio para las categorías de salida fue: CG = 0.037, PTH = 0.005, PE = 0.057, PFO = 0.032, PA = 0.048 y PEcoT = 0.037. Además, el error absoluto promedio (MAE) para este modelo fue 0.028, 0.001, 0.039, 0.022, 0.035 y 0.027 respectivamente.
Wernet et al., (2008)	Ofrecer un nuevo enfoque válido para la estimación de los parámetros de inventario clave en los casos donde los datos faltantes impidan un enfoque basado en procesos, para determinar el mejor tipo de modelo para este enfoque y validar los modelos resultantes con datos reales.	Esta investigación presenta un modelo que puede proporcionar estimaciones de datos de inventario e impactos ambientales. La demanda de energía acumulada (DEA) se eligió para la producción de un producto químico como el parámetro principal de salida. Además, se tomaron en cuenta otras categorías de impacto como productos. Los resultados indican que la RNA alcanza mayores correlaciones para seis parámetros de salida. El conjunto de entradas condensadas, tiene mejores indicadores R ² (Pearson), hasta de 0.74.

Los AGs y el ACV pueden tener un enfoque integrado, en el que otras técnicas como SMC, MTOPSIS y otras herramientas de toma de decisiones también pueden involucrarse con el objetivo de minimizar los impactos ambientales después de llevar a cabo el ACV. El uso del AGs para minimizar los impactos ambientales ha sido frecuente, se observan algunos ejemplos como en la administración de botellas de PET, en sistemas agrícolas, en sistemas fotovoltaicos para generar una configuración óptima de células fotovoltaicas alternativas (reducción del 27%), en la construcción de edificios verdes (reducción del 90% al 70%), y en un sistema fotovoltaico eólico-diesel autónomo con almacenamiento de batería. La minimización de los impactos a través de las AGs generalmente se enfoca en el CG, el RI, el ENR, los MJ primary, el costo de energía nivelado y los kg de CO₂ eq.

Por otro lado, los modelos difusos tienen un alto potencial para procesar información en condiciones de incertidumbre y subjetividad en el ACV. La aplicación de modelos difusos

busca evitar el uso de software comercial para el ACV, y su aplicación se enfoca principalmente en la estimación de los impactos ambientales. En este análisis, se observa que los SEDs se utilizan para estimar los impactos ambientales de una lámpara, en la administración de los residuos biológicos, en las centrales eléctricas, entre otros. Además, en estos estudios, la estimación de los impactos utilizando SEDs se centra en reducir los impactos como la eutrofización, el efecto invernadero, el smog y la acidificación.

Los modelos con RNAs permiten predecir los impactos ambientales en el ACV y también se han convertido en herramientas prácticas para estimar parámetros en el ICV. Se proponen las RNAs (al igual que la SEDs) para estimar las cargas ambientales. Los estudios anteriores muestran que se han aplicado en los sistemas de producción de hidrógeno, en la producción de tomate, arroz, pepino y papa. Además, esta técnica ya se ha utilizado para pronosticar el ICV. Algunos impactos que se han estimado con las RNAs son el CG, PE, PTH, PEcoT, PFO y PA.

3.3 Conclusiones

El ACV en la industria azucarera es eficiente cuando es aplicado en su forma tradicional; sin embargo, está limitado en algunas etapas donde existe incertidumbre y subjetividad, aunque algunos investigadores han realizado intentos para tratar la incertidumbre en los ICV y en la EICV, aún no es una práctica habitual en esta metodología y solo ha sido estudiada parcialmente. Otro inconveniente evidenciado en el estado del arte, es que el ACV solo se limita a estimar los impactos ambientales provocados por este proceso industrial; siendo necesario abordar la minimización de estos impactos o desarrollar herramientas de solución para las etapas que tienen mayor contribución ambiental en los resultados del ACV.

Con respecto al análisis del estado del arte de las técnicas de IA como apoyo al ACV, se demostró que estas técnicas complementan los resultados del ACV, haciéndolo más robusto y mejorando los alcances de esta metodología. La propuesta de crear modelos matemáticos para minimizar los impactos ambientales y costos de materias primas o aspectos económicos, es una alternativa muy interesante. El análisis del estado del arte también demostró que las técnicas de LD y las RNAs son eficientes al estimar los impactos ambientales o al realizar predicciones para los datos del ICV.

En conclusión, el estado de arte evidencia que el ACV aun presenta deficiencias, estos problemas debe ser tratados para mejorar sus resultados. Idealmente se debería tratar la incertidumbre en todas las etapas de la cadena de suministro del azúcar de caña, con esta mejora se podrían obtener los parámetros del ICV con incertidumbre, y los resultados obtenidos serían más confiables. Por otra parte, el ACV necesita ser apoyado por las técnicas de IA para mejorar sus resultados, esto, a partir de la minimización los impactos ambientales con optimización multiobjetivo (AGs) y utilizar técnicas que permitan mejorar algunas etapas que tienen contribuciones significativas (por ejemplo SEAD). El uso de estas técnicas debería comenzar con la cadena de suministro completa y luego migrar estos estudios a la producción de bagazo, melaza y más subproductos identificados en esta revisión.

Capítulo IV

Metodología de Investigación

Resumen

El contenido de esta sección, describe la metodología, los procedimientos, análisis y la clasificación de las variables; con la información anterior se desarrollan los modelos que permiten una solución factible a los problemas relacionados a la producción de azúcar estándar. El presente trabajo de investigación se lleva a cabo con la colaboración del Grupo Porres S.A. de C.V. (Ingenio San Pedro y la empresa Excelencia Cañera) y el Instituto Tecnológico de Orizaba. En este capítulo se estudia la evaluación de impactos ambientales con ACV, la estimación de tasas de fertilizantes con un SEAD y la optimización de los impactos ambientales con OMAG.

4.1 Metodología propuesta

La metodología propuesta está basada en el ACV, e integra las técnicas de IA con el objetivo de desarrollar una estrategia metodológica que complemente el ACV y lo vuelva aún más robusto. En la literatura actual, existen trabajos de ACV del azúcar de caña, en los que se evalúan los impactos ambientales en su forma tradicional, pero su aplicación se limita cuando existe incertidumbre o subjetividad en algunas etapas, además de que, solo se restringe a evaluar impactos, requiriendo también la minimización de los mismos. Es decir, en la actualidad no solo es necesaria la EICV en un sistema producto, también se requiere que el sistema sea optimizado.

Actualmente las técnicas de IA han incursionado en el ACV aportando la optimización, modelación de incertidumbre y subjetividad, no obstante, en la azúcar de caña no se ha observado su inclusión siendo el azúcar el bien más producido, y la industria azucarera una de las que más contamina en México y a nivel mundial. Lo anterior deriva del alto consumo de recursos, y energía por parte de la agricultura de la caña y su procesamiento en los ingenios, por esta razón, se aborda esta problemática con el diseño metodológico propuesto.

Esta propuesta tiene como objetivo llevar a cabo un ACV (de la cuna a la puerta) en su forma tradicional, pero apoyado con técnicas de IA que permitan la optimización de las etapas como el ICV, la interpretación de indicadores, y la optimización de los impactos del sistema producto.

Es a partir de los antecedentes previamente mencionados en este punto, que se desprende el diseño de la metodología propuesta para este estudio. Se aborda la metodología del ACV, propuesta a partir del estado del arte y apoyada en el método IMPACT 2002+, con un enfoque que integra las técnicas de IA. En la Figura 4.1 se observan los pasos de la metodología propuesta.

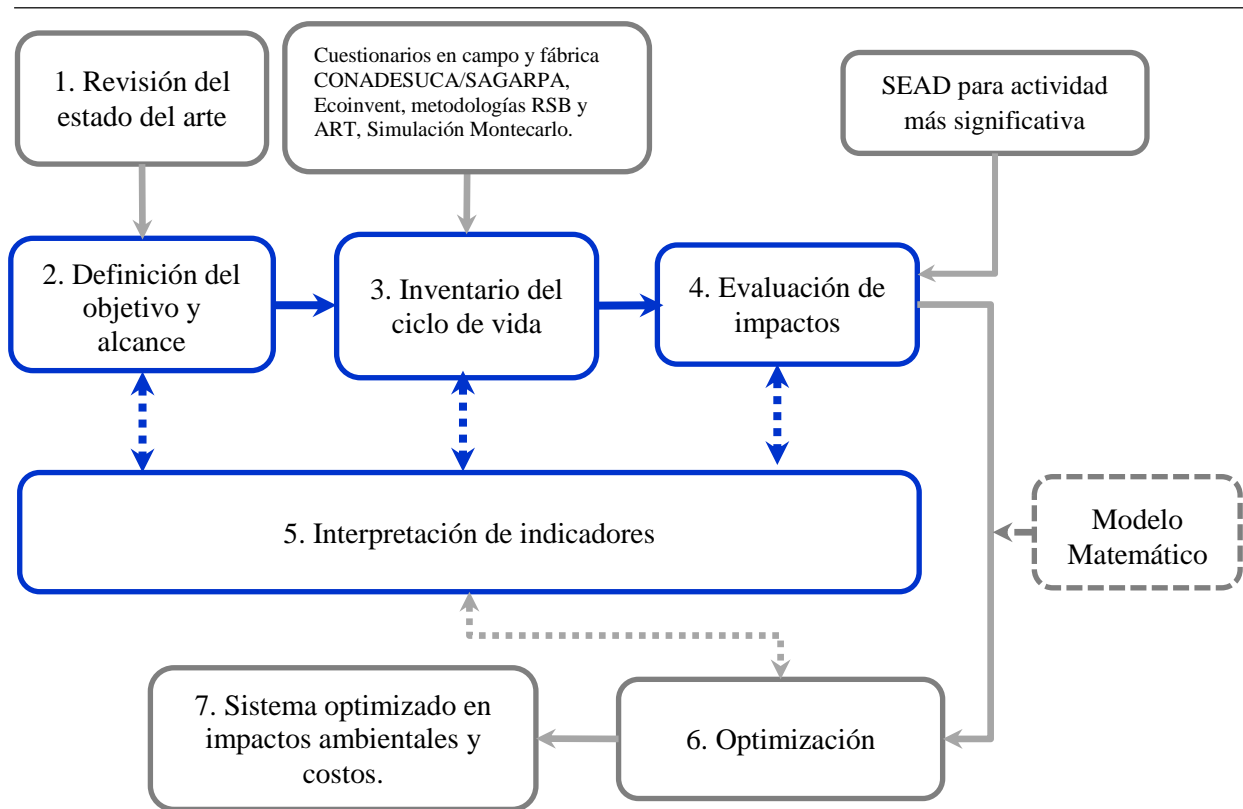


Figura 4.1 Metodología propuesta del enfoque integrado con ACV y técnicas de IA.

- 1) **Revisión del estado del arte.** Comprende revisar extensamente la bibliografía, con el objetivo de definir claramente los alcances del estudio.
- 2) **Definición del objetivo y alcance** (reuniones con directivos). Deben ser claros y consistentes con la aplicación que persiguen. Se establecen a través de las preferencias de los interesados, con el fin de que todos los criterios sean satisfechos en la investigación (contempla la unidad funcional, los límites del sistema, las reglas de asignación, los tipos de impacto, etc).
- 3) **Inventario de ciclo de vida (ISO 14041).** Comprende la obtención de datos cualitativos/cuantitativos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema, es decir, la recolección directa de datos o a través de la

simulación (inteligencia artificial, simuladores estadísticos o especializados, bases de datos especializadas, rangos obtenidos en campo, etc.) que ayuden en la obtención del ICV.

- 4) Evaluación de los impactos (ISO14042).** Evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV). Este paso se evalúa la importancia de los impactos potenciales utilizando los resultados del análisis de ICV, y la valoración de dichos impactos. La EICV se realiza mediante la clasificación, caracterización y normalización.

Clasificación: De acuerdo a la metodología del ACV se clasifica cada una de las salidas en las posibles emisiones (ejemplo, CO₂, CH₄, NO_x, etc.). Esto se lleva a cabo a través de análisis químicos, revisiones de la literatura disponibles, modelos matemáticos u otras herramientas disponibles.

Caracterización. De acuerdo a la metodología IMPACT 2002+, se categorizan todas las emisiones en las 15 categorías o mid-points.

Normalización. La normalización consiste en convertir el valor clasificado y categorizados en un valor entre 0 y 1 a manera de volver más comprensible este valor. Este paso se realizará mediante una normalización “menor es mejor”, es decir, los valores más bajos tendrán un valor normalizado menor, buscando siempre que esta relación sea así.

- 5) Interpretación de los indicadores (ISO 14043).** Un indicador único es más fácil de interpretar pues está compuesto de todos los indicadores de la metodología IMPACT 2002+, de esta manera se conoce qué indicador afecta de manera más significativa al ecosistema.
- 6) Optimización.** Para llevar a cabo la optimización será necesario crear un modelo matemático. Es decir, se desarrollará una modelación matemática del sistema, a manera de que pueda optimizarse a través de un software especializado.

La idea básica para el desarrollo del modelo matemático es recurrir a esas áreas de oportunidad en la industria azucarera donde sea posible efectuar cambios de modo que se minimicen los impactos ambientales. Es decir, se requerirá de funciones objetivo que minimicen los impactos ambientales, por ejemplo: en salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos.

Ejemplo de la posible formulación del proyecto:

$$\text{Min } Z = \text{Salud humana } X_1 + \text{Calidad del ecosistema } X_2 + \text{Cambio climático } X_3 + \text{Recursos } X_4$$

s.a.

$$X_1 \leq b_1$$

$$X_2 \leq b_2$$

⋮

Restricción de X_n

Ec. 4.1

Se puede agregar un criterio económico en la FO con el objetivo de minimizar el costo y minimizar el impacto ambiental. Para la optimización multiobjetivo se utiliza el software especializado Multigen en el que se incluye la utilización de AGs.

7) Sistema optimizado. Comprende las recomendaciones a los interesados en relación a la salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático, recursos y costos.

Los pasos de la metodología son aplicados en diferentes etapas del proyecto. Desarrollar cada una de las etapas implica seguir pasos específicos de la metodología. En la Figura 4.2 se observa el diagrama en donde se describen los pasos de la metodología, las etapas que incluyen el desarrollo de modelos y estudios que apoyan el ACV, y los resultados de cada una de estas etapas.

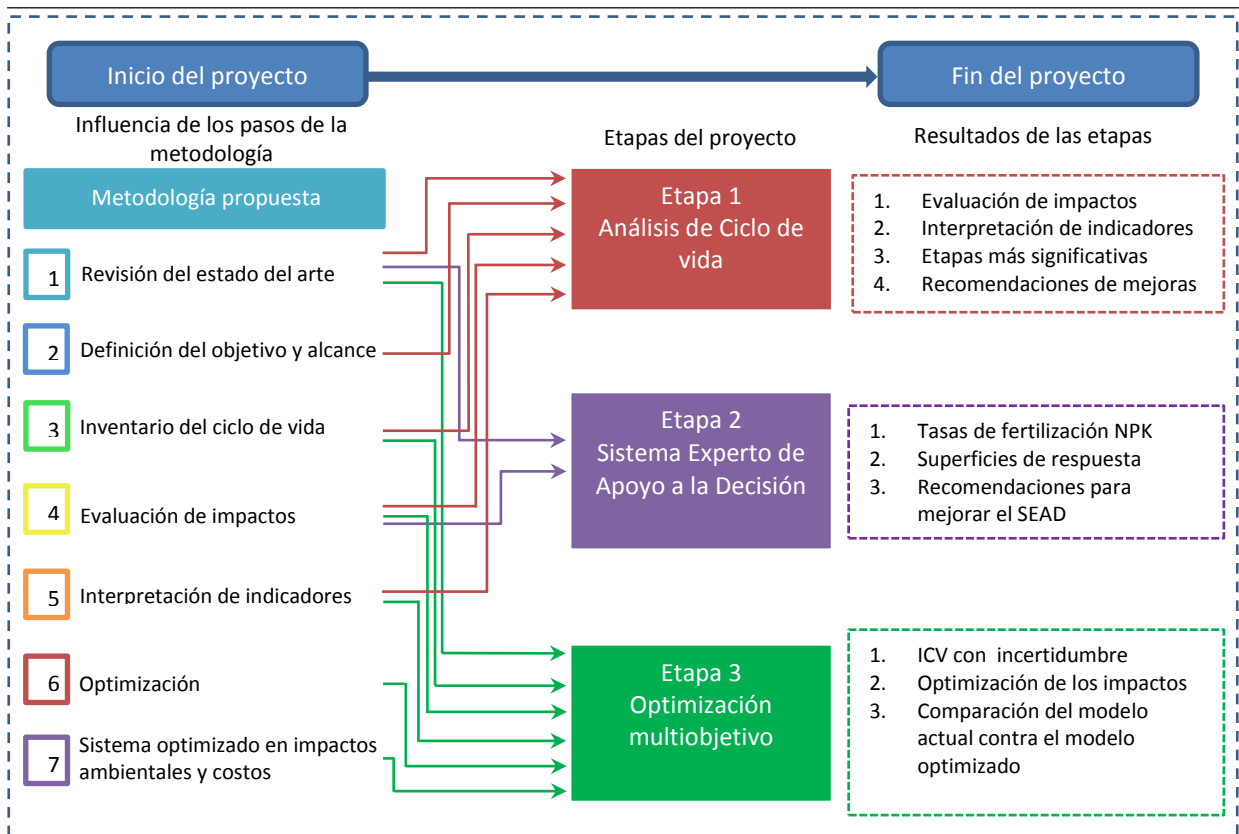


Figura 4.2 Metodología aplicada a las etapas del proyecto.

4.2 Etapa 1. Desarrollo del ACV en la producción de azúcar de caña

La primera etapa de esta tesis consiste en desarrollar un ACV de la producción de azúcar de caña, en el Ingenio San Pedro del grupo Porres. La metodología del ACV consta de cuatro pasos (ver Figura 2.1 del capítulo II), la definición del objetivo y alcance, el inventario del ciclo de vida, la evaluación de impactos y la interpretación de los indicadores. Sin embargo en este trabajo se agrega el paso de la revisión del estado del arte. Una vez obtenidos los resultados se podrán aplicar las técnicas que hagan más eficiente el ACV.

La industria de la caña de azúcar en México depende en gran medida del suministro de energía, combustibles fósiles y recursos materiales para su correcto funcionamiento. El uso excesivo de estos recursos más la deficiencia técnica y tecnológica causa graves consecuencias ambientales. Este trabajo científico tiene como objetivo analizar el daño ambiental atribuible a

la producción de caña de azúcar siguiendo la metodología de evaluación del ciclo de vida (ACV).

Un estudio de ACV es una técnica iterativa y que a medida que se reúnen datos e informaciones, varios aspectos del alcance pueden requerir modificaciones a fin de cumplir el objetivo original del estudio (ISO, 1998). En los siguientes párrafos, se describen todos los pasos para aplicar el ACV.

4.2.1 Estado del arte

La revisión del estado del arte comprende información de artículos en donde se confirma lo que se ha hecho actualmente en un área específica del conocimiento. Aplicando este concepto a esta investigación, el estado del arte se divide en dos puntos, el primero corresponde al estado del arte del ACV en la industria azucarera y el segundo al estado del arte de la integración de técnicas de IA en el ACV. Este análisis exhaustivo se incluye en el capítulo 4 en este documento.

4.2.2 Definición del objetivo y alcance del estudio

El objetivo principal del estudio es la razón por la cual se desarrolla un ACV. El objetivo debe estar claramente definido desde el principio, ya que tiene una fuerte influencia sobre las siguientes etapas (Sonnemann et al., 2003). El ACV se orienta a diferentes objetivos: comparar sistemas globales en uso las entradas y salidas del sistema con otros productos, procesos o actividades alternativas de recursos, energía, etc.; identificar estados donde se pueden reducir el uso recursos; comparar; apoyar el desarrollo de nuevos productos, procesos o actividades llevando a cabo una reducción total de recursos y emisiones, e identificar áreas con mayor impacto ambiental (Vigon et al., 1993).

4.2.2.1 Objetivo

El objetivo de este estudio de ACV lleva implícito reducir el uso de recursos e identificar áreas con mayor impacto, a continuación se establece el objetivo de este estudio:

Evaluar el daño ambiental atribuible a la producción de azúcar de caña durante su ciclo de vida, desde la manufactura de las materias primas utilizadas, hasta su disposición como producto terminado, identificando las áreas con mayor impacto ambiental y buscando la manera de mejorar el rendimiento ambiental.

4.2.2.2 Alcance del estudio

Un sistema producto en la industria azucarera representa toda la cadena de suministro de este producto (desde la siembra hasta la disposición final del producto al cliente), un subsistema puede ser representado, por ejemplo, como la etapa agrícola de la caña de azúcar y un sistema unitario se puede representar como la etapa de cultivo en la agricultura de la caña.

El sistema producto a evaluar en el ACV (de la cuna a la puerta) es la obtención de azúcar de caña, el cual se divide en cuatro subsistemas, *la agricultura de la caña de azúcar, el transporte de caña, la producción de azúcar y la cogeneración de electricidad a partir del bagazo.*

La agricultura de caña de azúcar comprende cuatro procesos unitarios, a continuación se describen: 1. Preparación de suelo, crecimiento de caña de azúcar, quema previa y cosecha.

El *Transporte de la caña al ingenio azucarero*, se evalúa el consumo de combustible fósil, dependiendo de la cantidad de toneladas que transporte el camión/tractor y la distancia recorrida.

La producción de azúcar en fábrica se divide en las siguientes etapas: molienda, combustión del bagazo, clarificación del jugo y evaporación y cristalización.

La cogeneración de electricidad a partir del bagazo comprende la combustión del bagazo de caña y su aprovechamiento para producir energía.

Este proyecto de investigación será validado en el Ingenio San Pedro, la empresa Excelencia Cañera y con ayuda de los pequeños y medianos productores de caña.

4.2.2.3 La unidad funcional (UF)

Define la cuantificación de las características de desempeño del producto. En este trabajo de investigación se definieron dos unidades funcionales. A continuación se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 UF de los sistemas producto.

Sistema producto	Producto	UF
Agricultura	Caña de azúcar	1 tonelada de caña de azúcar
Transporte de la caña	Caña de azúcar	1 tonelada de caña de azúcar
Producción de azúcar	Azúcar estándar	1 tonelada de azúcar estándar
Cogeneración de electricidad	Azúcar estándar	1 tonelada de azúcar estándar

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.4 Límites del sistema

Los límites del sistema es la selección de los elementos del sistema físico a modelar, depende de la definición del objetivo y el alcance del estudio (ISO, 1998). Las etapas, procesos y flujos que deben tomarse en cuenta para los límites del sistema son los siguientes (P. Roy et al., 2009):

- ✓ Entradas y salidas en la fase principal de fabricación.
- ✓ Distribución/transportación.
- ✓ Producción y uso de combustibles, de electricidad y de calor.
- ✓ Utilización y mantenimiento de productos.
- ✓ Disposición de residuos del proceso y de productos.
- ✓ Recuperación de productos usados (incluyendo la reutilización, el reciclaje y la recuperación de energía).
- ✓ Fabricación de materiales secundarios.
- ✓ Fabricación, mantenimiento y decomiso de equipos capitales.

La producción de azúcar en un marco de ACV incluye diferentes etapas en las que se puede evaluar el impacto ambiental, en la Figura 4.3 se puede observar el esquema general que incluye las etapas estudiadas en esta investigación.

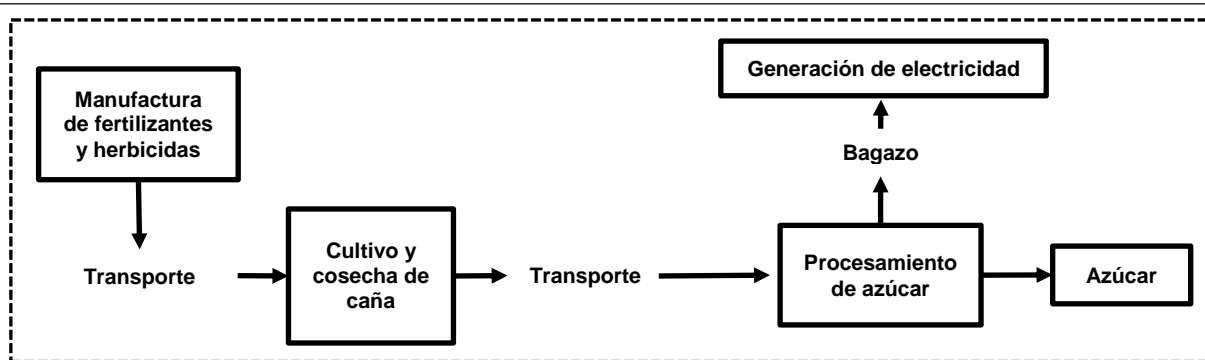


Figura 4.3 Límites globales en el sistema producto industria azucarera.

Los límites iniciales de este sistema comprenden los siguientes criterios: Criterios de inclusión: actualmente se contempla incluir en este estudio la parte de la agricultura, el transporte de la caña al ingenio, el proceso de producción de la azúcar estándar y la cogeneración de electricidad a partir del bagazo. Las etapas que se prevé sean omitidas son la producción de etanol, la distribución de la azúcar como producto final y la comercialización. Es conveniente reconocer que un estudio de ACV es una técnica iterativa y que a medida que se reúnen datos e informaciones, varios aspectos del alcance, los límites iniciales así como otros aspectos pueden requerir modificaciones a fin de cumplir el objetivo original del estudio. En la Figura 4.4 se observa un esquema de los límites del sistema agrícola y el transporte de caña al ingenio. En la Figura 4.5 se observa el límite inicial del proceso de producción de azúcar de caña.

La obtención de caña de azúcar se lleva a cabo en campos de la región comprendida del bajo de Papaloapan y los Tuxtlas, incluyendo los municipios de Lerdo, Ángel R. Cabada y Saltabarranca, con un área aproximada de 18,562 hectáreas, de las cuales se obtiene un promedio aproximado de 60 a 90 toneladas de caña de azúcar por hectárea. Abasteciendo a este ingenio el 75% de ejidatarios y el 25% de pequeños propietarios.

El proceso de la agricultura comienza con la manufactura de los fertilizantes y de los productos químicos necesarios para la agricultura de la caña de azúcar, una vez producidos, el siguiente paso es el transporte de ellos hacia los campos. La preparación del suelo requiere del uso de recursos como el agua para riego, además de la utilización de fertilizantes, pesticidas, raticidas, herbicidas, etc., con el propósito de hacer crecer la caña de azúcar en las mejores

condiciones posibles. Previo a la cosecha de la caña, específicamente en estos cañaverales, se quema aproximadamente el 70% de las hectáreas que producen caña con el objetivo de eliminar el exceso de basura y evitar accidentes en los campesinos. La recolección de caña (cosecha) se realiza manual y mecánicamente utilizando elementos humanos y equipos mecánicos, lo que comprende el uso de tractores para cortar y subir la caña a camiones que la envían hacia el Ingenio San Pedro. El transporte de la caña de azúcar se hace por medio de camiones; el equipo de transportes es propiedad de ejidatarios, pequeños ejidatarios y maquileros no cañeros. La flotilla está compuesta de 548 camiones que pueden cargar un aproximado de 10 a 14 toneladas de caña. Por camión y por carretas tiradas hasta 10 con promedio de peso de 6 a 8 toneladas de caña por carreta. La etapa de transporte termina cuando los camiones depositan la caña de azúcar en el ingenio.

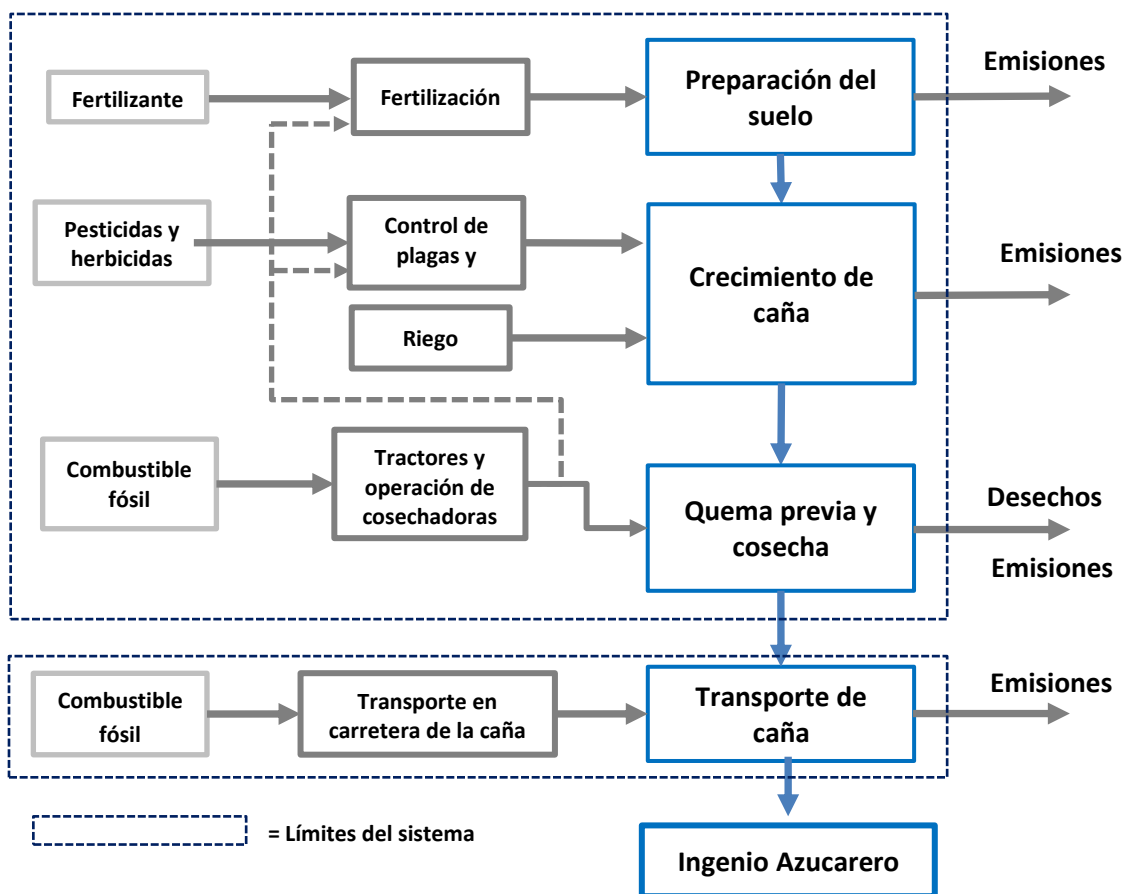


Figura 4.4 Límites iniciales del sistema agrícola en la industria azucarera.

El ingenio San Pedro, se encuentra localizado a 2 Kilómetros de la Ciudad de Lerdo de Tejada, Veracruz; carretera Lerdo-Saltabarranca Km 2.5. La superficie total construida es de 30,237 metros cuadrados sobre un terreno de 385,815 metros cuadrados. La zafra comprende un periodo de 5 a 6 meses, iniciando a finales de noviembre o en diciembre, y concluyendo en la segunda quincena de mayo o primera de junio. Este período varía de acuerdo a la producción que se obtenga de caña de azúcar en el campo y según las situaciones climatológicas de la región que imperen en uno u otro año (CONADESUCA, 2016a).

El proceso de obtención de azúcar comienza con la recepción de la caña en el área de batey del ingenio. En la etapa de molienda, la caña pasa por unas cortadoras y es triturada para extraer el máximo de jugo posible, el jugo se almacena en tanques y posteriormente se filtra para obtener un jugo filtrado. Al mismo tiempo se obtiene el bagazo que se envía a la planta de cogeneración de energía para producir electricidad. El jugo pasa a la etapa de clarificación de jugo y tratamiento en donde además de ser calentado, algunos químicos son agregados con el propósito de separar las impurezas que se van formando a lo largo del proceso. El jugo una vez clarificado, pasa a entonces al sistema de evaporación y cristalización donde se hierve en tachos para formar los cristales de azúcar.

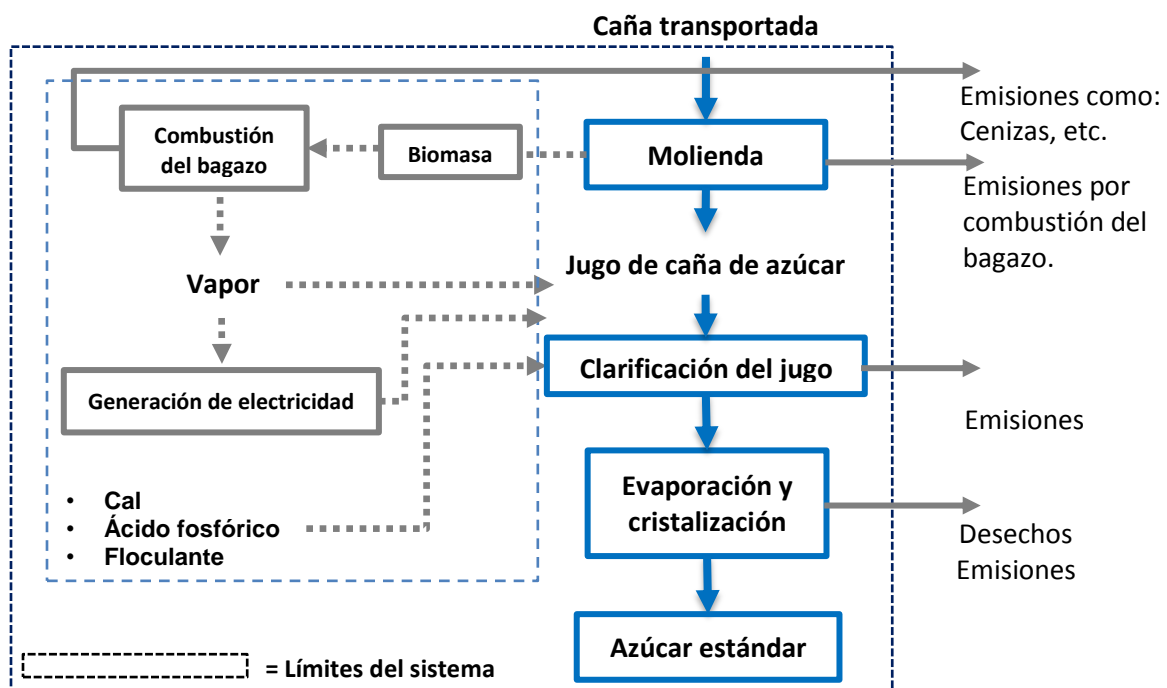


Figura 4.5 Límites iniciales de la manufactura de azúcar de caña en la industria azucarera.

4.2.3 Inventario de ciclo de vida de la azúcar de caña

El ICV es la fase de evaluación del ciclo de vida que envuelve la colección y cuantificación de entradas y salidas de un producto a través de su ciclo de vida (American National Standards Institute, 2006). La recolección de datos se llevó a cabo a través de un cuestionario que tiene el propósito de identificar los datos típicos de las entradas y salidas de la agricultura de la caña de azúcar. Estos datos son recolectados para ser sujetos a respectivos análisis. Las entradas y salidas se envían en la medida de lo posible, como un indicador de incertidumbre, preferentemente con información estadística, o al menos como intervalos (ISO 14049, 2000).

Los límites del sistema contemplan cuatro etapas de la producción de azúcar. La recolección de datos en la parte agrícola comprende información de un ciclo de cultivo completo y en el caso del procesamiento de caña en fábrica los datos son obtenidos por año. La Tabla 4.2 muestra los métodos que fueron utilizados para recoger la información del ICV.

Tabla 4.2 Métodos utilizados para la recolección de datos del ICV.

Sistema producto	Generación de datos
Agricultura de la caña de azúcar	DC, ART y RSB, SimaPro-Ecoinvent, SMC
Transporte de la caña de azúcar	DC, SMC ¹
Producción de la azúcar de caña y	DC, DH ² , SMC
Cogeneración de energía	DC, DH , SMC

DC = Datos en campo. DH = Datos históricos. RSB= Metodología de la Roundtable on sustainable biofuels. ART = Métodos de la Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station. SMC = Simulación Monte Carlo.

El software SimaPro ya incluye el ICV para la etapa de manufactura de fertilizantes, por lo tanto los datos del ICV y las emisiones generadas en esta etapa son incluidos en este estudio. Los datos de entrada del ICV se obtuvieron de las bases de datos de la Comisión Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), los campos agrícolas y el ingenio azucarero. Los medianos y pequeños productores que cultivan caña de azúcar para

¹ Los datos obtenidos por SMC se utilizan en la OMAG y también son útiles para el ICV.

² DH = datos históricos recogidos de la base de datos de la CONADESUCA y de SAGARPA

venderla al ingenio azucarero también proporcionaron datos adicionales. El área de suministro del ingenio azucarero se ubica en la Región Central de Veracruz, México. El tipo de suelo en esta región varía (vertisoles, gleysoles, cambisoles y litosoles), con un clima cálido y regular, a una temperatura promedio de 25° C y una precipitación anual promedio de aproximadamente 2000 mm (SAGARPA, 2009). En 2016, el área aproximada ocupada para el cultivo de caña de azúcar fue de 18,736 hectáreas, en las cuales se obtuvo un promedio de 64 toneladas de caña de azúcar por hectárea. En la etapa de cosecha, se molieron 1,202,882 toneladas de caña de azúcar. El 75% de campesinos y el 25% de los pequeños propietarios abastecen el ingenio azucarero. El 17.5% de la caña de azúcar plantada se cosechó mecánicamente, mientras que el 82% se cosechó manualmente. Alrededor del 89% de la caña de azúcar fue quemada antes de ser cosechada. En ese mismo año, se obtuvieron 123,637 toneladas de azúcar en bruto; en este ingenio azucarero no se produce alcohol (CONADESUCA, 2016a).

Con respecto a los fertilizantes nitrogenados; por ejemplo, el fosfato diamónico tiene una concentración igual a 18 – 46 – 00, es decir, 18% de nitrógeno amoniacal y 46% de fósforo total. En los datos del ICV se obtuvo un promedio de 0.8851 kg de fosfato diamónico/t-caña. Este valor debe ser separado por su contenido de nitrógeno y de fósforo para facilitar su inclusión en el software SimaPro, por ejemplo:

$$DAP \text{ (fórmula química)} = 18\% N - 46\% P_2O_5 - 0\% K_2O \quad \text{Ec 4.2}$$

$$N = \%N \times \frac{\text{kg promedio de DAP}}{\text{ton azúcar}}; P_2O_5 = \%P_2O_5 \times \frac{\text{kg promedio de DAP}}{\text{ton azúcar}}$$

En la Tabla 4.3, se describe el porcentaje de contenido total de los macronutrientes como el Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), así también los kilogramos promedio de los fertilizantes utilizados en los campos agrícolas. También se describen los valores promedio por tipo de fertilizante y los kilogramos por hectárea que se utilizan anualmente en los campos agrícolas.

Tabla 4.3 Porcentajes de contenido total de elementos químicos en los fertilizantes

Tipo de fertilizante	Porcentaje de contenido total de los macronutrientes				Kg promedio del fertilizante utilizado	kg/ha				Referencia
	N	P	K	S		N	P	K	S	
Urea	46%	-	-	-	138	63.48	-	-	-	Campo agrícola
Fosfato diamónico	18%	46%	-	-	60	10.8	27.6	-	-	Campo agrícola
Cloruro de potasio	-	-	60%	-	120	-	-	72	-	Campo agrícola
Sulfato de amonio	21%	-	-	24%	120	25.2	-	-	28.8	Campo agrícola
Cal agrícola	-	-	-	-	5000	-	-	-	-	Campo agrícola

El transporte de caña de azúcar se realiza en camiones y carretas tiradas por tractores. Las flotas están compuestas por 639 camiones y de tráileres que pueden cargar aproximadamente de 10 a 14 toneladas de caña de azúcar. Las carretas tiradas por tractores pueden cargar hasta 10 toneladas con un peso promedio de 6 a 8 toneladas de caña de azúcar. En relación al diésel utilizado para el transporte de la caña, un valor promedio estimado por los gerentes de campo en el Ingenio San Pedro es de 1.63 litros de diésel por tonelada acarreada (1.63 l/t-acarreada). Este valor se tiene que convertir a kg diésel/t-caña para su manipulación en SimaPro, por lo tanto, se utiliza una conversión de energía. Por ejemplo, se estima que el recorrido promedio de los campos al ingenio equivale a 30 km, y representa una tonelada de caña en un camión que puede llegar a transportar 24 toneladas.

$$36.2 \frac{MJ}{L} * 1.63 \frac{l}{ton} = 59.006 \frac{MJ}{ton\ caña} * \frac{1\ kg\ diesel}{42.3\ MJ} = 1.395\ kg\ diesel/ton\ caña \quad Ec\ 4.3$$

En 2016, el consumo total de diésel en el ingenio azucarero fue de 384,171.00 litros, y se estima que se consumen 3.1 litros para obtener una tonelada de azúcar estándar. Se utilizaron 322,974 toneladas de bagazo en la cogeneración de la electricidad, y la combustión del bagazo generó 17,000,000 kWh de energía, lo que representa aproximadamente 14.1 kWh/ton caña de azúcar (CONADESUCA, 2016a). Los datos de los campos agrícolas y del ingenio azucarero se obtuvieron a través de encuestas (número de encuestas específicas autorizadas por el gerente de campo del ingenio azucarero) aplicadas a ingenieros en agronomía de las empresas, y a productores de caña de azúcar. Los datos reportados en la Tabla 4.4, son datos de entrada y salida del inventario (valores promedio).

Tabla 4.4 Entradas en la agricultura de la caña de azúcar

Recursos	Cantidad	Unidad	Referencia
Preparación de suelo			
Agua de riego	0.125	mm/ton caña	Campo agrícola
Superficie de caña de azúcar cosechada	18,736	ha	(CONADESUCA, 2016a)
Caña cosechada	64	ton/ha	(CONADESUCA, 2016a)
Urea	2.16	kg/ton caña	Campo agrícola
Fosfato diamónico	0.94	kg/ton caña	Campo agrícola
Cloruro de potasio	1.88	kg/ton caña	Campo agrícola
Sulfato de amonio	1.88	kg/ton caña	Campo agrícola
Crecimiento de caña			
Pesticida (Lambda cyhalothrin eq)	0.0625	kg/ton caña	Campo agrícola
Pesticida (Fosfuro de aluminio)	0.000938	kg/ton caña	Campo agrícola
Herbicidas	0.2344	kg/ton caña	Campo agrícola
Preparación de suelo y cosecha de caña			
Diésel (en cosecha)	2.64	kg/ton caña	Campo agrícola
Diésel (en preparación de suelo)	1.47	kg/ton caña	Campo agrícola
Transporte de caña			
Diésel (camiones y carretas tiradas)	1.0294	kg/ton caña	Ingenio azucarero
Cogeneración de electricidad			
Bagazo quemado	2.6123	ton/ton azúcar	(CONADESUCA, 2016a)
Ingenio azucarero			
Agua	30.1057	m ³ /ton azúcar	Ingenio azucarero
Combustóleo	121.155	MJ/ton azúcar	(CONADESUCA, 2016a)
Cal	7.105	kg/ton azúcar	Ingenio azucarero
kWh	0.7065	kWh/ton azúcar	(CONADESUCA, 2016a)

Los datos que se muestran en la Tabla 4.5, provienen de los promedios semanales obtenidos durante la cosecha 2015-2016, estos datos fueron cálculos totales de los valores de entrada y salida para la fabricación de azúcar del ingenio azucarero.

Tabla 4.5 Entradas y salidas totales en la producción de azúcar

Recursos	Cantidad	Unidad	Referencia
Productos intermedios totales			
Caña de azúcar molida (en campo)	1,144,557.00	ton	(CONADESUCA, 2016a)
Caña de azúcar cruda molida (en fábrica)	1,202,882	ton	(CONADESUCA, 2016a)
Bagazo	322,974	ton	(CONADESUCA, 2016a)
Recursos totales			
Electricidad consumida de CFE	87,348	kWh	(CONADESUCA, 2016a)
Combustóleo total consumido	384,171	MJ	(CONADESUCA, 2016a)
Diésel (en transporte de caña)	16,985,226	kg	Ingenio azucarero
Uso de cal	878,441	kg	Ingenio azucarero
Agua	3,722,174	m ³	Ingenio azucarero
Productos			
Caña de azúcar (en ingenio)	9.73	ton caña/ton azúcar	(CONADESUCA, 2016a)
Azúcar estándar	123,637	ton	(CONADESUCA, 2016a)
Excedente de electricidad	17,000,000	kWh	(CONADESUCA, 2016a)
Desperdicios			
Molasa	0.315	kg/ton azúcar	Ingenio azucarero
Cenizas	45	ton/día	Ingenio azucarero
Lodos	350	ton/día	Ingenio azucarero

Abreviatura. CFE = Comisión Federal de Electricidad

Las emisiones atmosféricas se calcularon utilizando la metodología RSB (Roundtable on Sustainable Biofuels, 2012). La RSB GHG Calculation Methodology, es una norma internacional válida a nivel mundial y específica de la metodología de cálculo de los gases de efecto invernadero (GEI) que deben utilizar los operadores participantes de RSB, que producen, convierten, procesan, comercializan, transportan y distribuyen biomasa/biocombustibles en los sistemas de certificación. La RSB es una metodología que permite estimar las emisiones de GEI en el ACV de la producción de biocombustibles; por ejemplo, las emisiones de CO₂, CH₄ del uso de la tierra, N₂O y NO_x de las emisiones agrícolas, refinación y producción de combustible, transporte y almacenamiento de combustible, emisiones de combustión y NH₃ de fertilizantes minerales. En las ecuaciones 4.4 y 4.5 se describen los modelos matemáticos para el cálculo de las emisiones de los GEI. Los cálculos incluyen la producción de fertilizantes y pesticidas, la energía utilizada para las máquinas agrícolas y las emisiones en el campo (Roundtable on Sustainable Biofuels, 2012).

$$E_{agricultura} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] =$$

$$\frac{E_{fertilizantes} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] + E_{pesticidas} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] + E_{máquinas agrícolas} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] + E_{efluentes} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] * \text{factor de asignación}}{\text{Rendimiento del producto}_{\text{producto principal (cultivo)}} \left[\frac{kg \text{rendimiento del producto}}{ha} \right]} \quad \text{Ec 4.4}$$

Con

$$E_{fertilizantes} \left[\frac{kgCO_2}{ha} \right] = \sum \text{Tipo}_i \text{ de fertilizante} \left[\frac{kg}{ha} \right] * EF_{ferti} \left[\frac{kgCO_2}{kg} \right] \quad \text{Ec 4.5}$$

Dónde: E_{ferti} ; factor de emisión del tipo de fertilizante (de la base de datos Ecoinvent). Respecto a la modelización de las emisiones de N_2O y NO_x ; en la ecuación 4.6, se describe el modelo para calcular las emisiones a la atmósfera de N_2O (Roundtable on Sustainable Biofuels, 2012).

$$N_2O = \frac{44}{28} * (EF_1 * N_{tot} + N_{cr}) + EF_4 * \frac{14}{17} * NH_3 + EF_5 * \frac{14}{62} * NO_{3-} \quad \text{Ec 4.6}$$

Dónde: N_2O = emisiones de N_2O ; $EF_1 = 0.01$; N_{tot} = entrada total de nitrógeno; N_{cr} = nitrógeno contenido en los residuos del cultivo; $EF_4 = 0.01$; NH_3 = pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco; $14/17$ = conversión de kg NH_3 en kg NH_3-N ; $EF_5 = 0.0075$; NO_3 = pérdidas de nitrógeno en forma de nitrato; $14/62$ = conversión de kg NO_3- en kg NO_3-N . Los modelos para emisiones por uso de la tierra, amoníaco, nitrato y quema en el campo antes de la cosecha se pueden encontrar en la norma internacional RSB.

Con respecto al cálculo de las emisiones del suelo, se utilizaron los modelos desarrollados por la Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART). La ART reúne un conjunto de métodos para estimar las emisiones directas en el campo. Estas emisiones provienen de los nutrientes y pesticidas utilizados en los suelos agrícolas, así como de los metales pesados; por ejemplo, cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn). Para la erosión del suelo se utilizan promedios de contenido de metales pesados para tierras de cultivo, pastos, prados y cultivos intensivos. En la ecuación 4.7, se describe el

modelo para calcular las emisiones de metales pesados por erosión (Nemecek & Schnetzer, 2012).

$$M_{erosión\ i} = c_{tot\ i} * B * a * f_{erosion} * A_i \quad \text{Ec 4.7}$$

Dónde: $M_{erosión}$ = emisiones de metales pesados relacionadas con la agricultura a través de la erosión; $C_{tot\ i}$ = contenido total de metales pesados en el suelo en mg por kg de suelo (Humbert, Schryver, Bengoa, Margni, & Jolliet, 2012); B = cantidad de erosión del suelo; a = factor de acumulación 1.86; $F_{erosión}$ = factor de erosión considerando la distancia al río o lagos; A_i = factor de asignación para la participación de insumos agrícolas en el total de insumos para metales pesados i (Nemecek & Schnetzer, 2012).

El balance de todas las entradas en el suelo y las salidas del suelo es una emisión a la tierra agrícola. En la ecuación 4.8 se describe el modelo.

$$M_{soil\ i} = (\sum inputs_i - \sum outputs_i) * A_i \quad \text{Ec 4.8}$$

Dónde: $inputs_i$ = balance de fertilizantes, pesticidas, semillas y deposición; $outputs_i$ = balance de biomasa exportada, lixiviación y erosión. Los modelos y métodos explicados anteriormente solo representan una fracción de todos los utilizados en este estudio (metodología RSB y métodos ART) para las emisiones al aire y al suelo.

Las emisiones de agua y las emisiones restantes (nitrato NO_3^- - lixiviación a aguas subterráneas, fosfatos PO_4^{3-} lixiviación a aguas subterráneas, escorrentía a aguas superficiales, emisiones de fósforo (P) a través de la erosión del agua a aguas superficiales) se tomaron directamente de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.

4.2.4 Evaluación de impactos en la producción de azúcar de caña

La evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV) esta supervisada por la norma ISO 14042. En esta, se evaluará la importancia de los impactos potenciales utilizando los resultados del análisis de ICV y la valoración de dichos impactos. La evaluación se realizará a través de la clasificación, caracterización y normalización. La evaluación de los impactos es la

asignación de los resultados del ICV a ciertas categorías bien definidas (ejemplo, calentamiento global, toxicidad humana, oxidación fotoquímica, etc.) llamadas puntos medios (midpoints) y posteriormente a categorías de daño (ejemplo, salud humana, calidad del ecosistema, etc.) llamadas puntos finales (endpoints).

La EICV vincula cada flujo primario del ICV a los impactos correspondientes, por ejemplo, el calentamiento global o la toxicidad humana llamada puntos medios, y posteriormente a las categorías de daños, por ejemplo, a la salud humana o la calidad del ecosistema llamadas puntos finales (Jolliet et al., 2003). Impact 2002+ es un método para el EICV que implementa un enfoque factible que vincula los datos de ICV a los puntos medios y los agrupa en los puntos finales (Filimonau, 2016). Otros métodos están orientados al enfoque de punto medio como CML-IA, EDIP o TRACI, otros están orientados a enfoques de punto final como Eco-indicador o Eco-escasez, y enfoques que vinculan puntos medios y puntos finales como IMPACT 2002+. Este método también incluye una amplia cobertura de sustancias en sus inventarios de emisiones y nuevos cambios en los factores de caracterización (Jolliet et al., 2003). La elección del nivel de impacto depende de la meta, el alcance y los objetivos del estudio en particular. También es importante tener en cuenta el nivel de experiencia y el conocimiento científico que los analistas tienen sobre el ACV. Por lo general, los resultados de las categorías de punto final son más manejables para que los no científicos lo entiendan. Por lo tanto, pueden ser más adecuados para el diseño de políticas y la toma de decisiones de gestión (ISO, 2000). La EICV se llevó a cabo con la metodología IMPACT 2002+ a través de la clasificación, caracterización y normalización. Se eligió este método porque tiene una base científica sólida y ha sido aceptado internacionalmente. También se eligió en función del objetivo y el alcance del estudio y para gestionar el enfoque de punto medio-punto final, que proporciona una interpretación más sencilla para los gerentes de las centrales azucareras. La interpretación de los resultados se basa en el análisis global del sistema del producto considerando las cuatro etapas mencionadas anteriormente y bajo los requisitos y recomendaciones de la norma ISO 14043 (Lestari et al., 2013).

4.3 Etapa 2. Sistema experto de apoyo a la decisión para la fertilización NPK

El SEAD consta de dos modelos; el primero es el modelo de condición edáfica (CED-M); este modelo se diseñó con indicadores físicos y químicos del suelo. El segundo, es el modelo de fertilización NPK (NPK-M); en este modelo se utilizan la condición edáfica, los macronutrientes NPK disponibles y los rendimientos de la caña de azúcar en su diseño. En la Figura 4.6, se describe el diagrama operacional del SEAD.

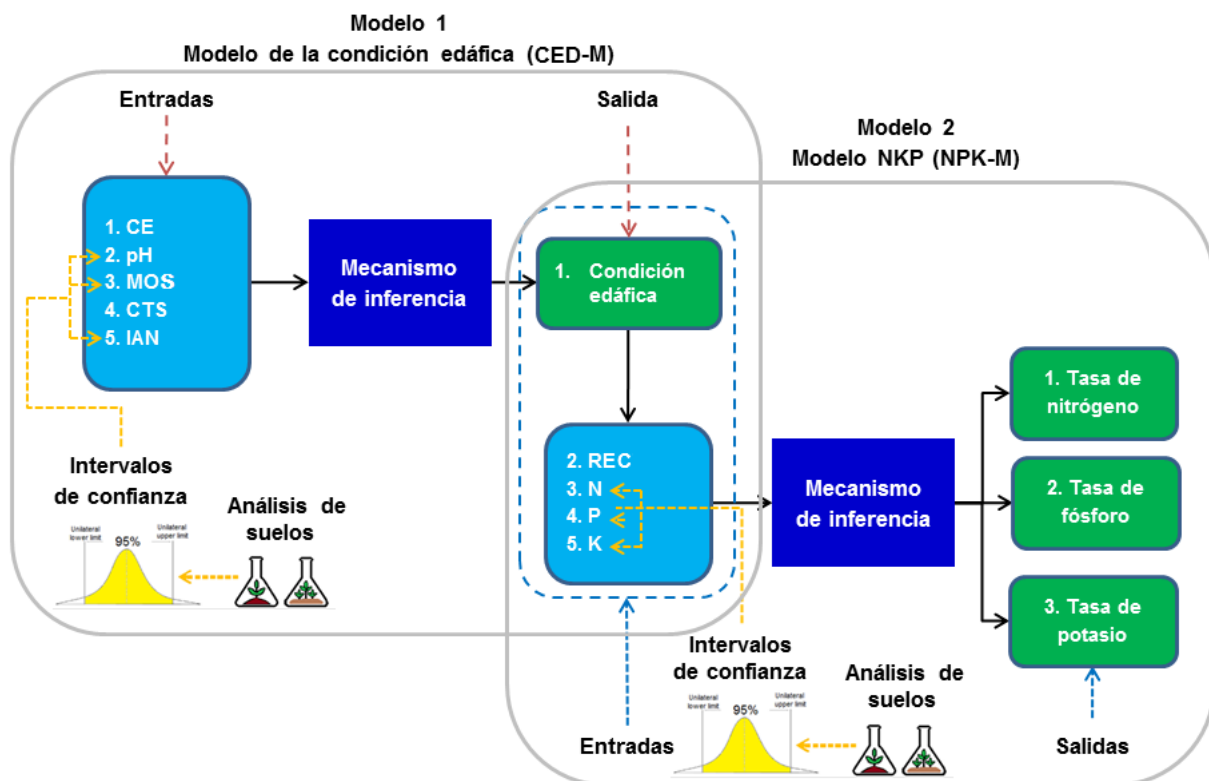


Figura 4.6 Diagrama operacional del SEAD.

4.3.1 Introducción

La fertilidad del suelo se define comúnmente con respecto a la capacidad de un suelo para suministrar nutrientes a los cultivos (Watson, Atkinson, Gosling, Jackson, & Rayns, 2002). Cuando los nutrientes en el suelo están equilibrados los cultivos tienen un mayor rendimiento; sin embargo, cuando faltan algunos nutrientes o están presentes en cantidades excesivas, el rendimiento del cultivo se reduce (Pachón et al., 2017).

La caña de azúcar es un cultivo altamente extractivo de nutrientes del suelo y requiere tasas considerables de fertilización con macro y micronutrientes para satisfacer sus necesidades (CONADESUCA, 2015b). Con respecto a la aplicación de macronutrientes como NP y K la mayoría de los agricultores tienen la idea errónea de que una mayor cantidad de fertilizantes proporcionará una mayor productividad, dando paso a un exceso de fertilización (Yang-Rui et al., 2016). El exceso de fertilización causa una grave contaminación ambiental en el sistema agroecológico (Yang-Rui & Li-Tao, 2015). Por ejemplo, la escorrentía superficial del sistema agroecológico contamina las fuentes de agua (Tian-Ming et al., 2012), reduce la calidad del suelo debido a la acidificación y genera impactos en la calidad del aire (Cheesman, 2004). Entre otras formas de contaminación ambiental, como se informó en (R. Roy, Finck, Blair, & Tandon, 2006). La agricultura requiere que los recursos como el agua, la energía y los fertilizantes se utilicen con cuidado y eficiencia para proteger y mantener el medio ambiente. La agricultura de precisión debe mejorarse mediante la aplicación de recursos optimizados (Dengel, 2013).

4.3.2 Estado del arte

A continuación se presenta una revisión del estado de la técnica relacionada con la aplicación de sistemas expertos difusos en la fertilización. Aarthi & Sivakumar, (2017) proponen un sistema experto difuso para estimar la cantidad requerida de macronutrientes del suelo para minimizar el costo y mejorar la toma de decisiones. Este modelo utiliza los niveles actuales de NPK como variables de entrada y recomienda las cantidades apropiadas de NPK como salida. Ashraf, Akram, & Sarwar, (2014) desarrollaron un SEAD difuso para la cosecha de trigo. El objetivo era desarrollar un modelo de sistema de información geográfica difuso para la clasificación del uso de fertilizantes para el cultivo de trigo. El modelo es lo suficientemente general como para ser utilizado para cualquier otro tipo de cultivo. Ashraf, Akram, & Sarwar, (2014b) proponen un sistema de inferencia difusa tipo II (apoyado por un sistema de información geográfica) para estimar la tasa de fertilizantes para el trigo irrigado. Este sistema experto difuso puede ayudar a identificar los patrones espaciales de los requisitos de fertilizantes para cualquier cultivo. He, Wang, He, Dong, & Wang, (2011) diseñaron algoritmos de apoyo a la decisión de fertilización utilizando el modelo de principios de fertilización agrícola. Los algoritmos obtienen el mapa de distribución de la fertilidad de la

tierra mediante la expansión de conjuntos. Además, puede deducir el rendimiento óptimo de los cultivos y el esquema de fertilizantes de N, P y K. Singh & Sharma, (2014) propusieron un sistema experto difuso para calcular las tasas de fertilizantes NPK para el cultivo de trigo, de acuerdo con los niveles de NPK encontrados durante la prueba de suelo. En consecuencia, el sistema experto difuso puede reducir la contaminación del agua del subsuelo y minimizar los costos. Papadopoulos, Kalivas, & Hatzichristos, (2011) proponen un SEAD difuso que consta de cuatro niveles; cada nivel contiene uno o más sistemas difusos que infieren sus parámetros de enlace y juntos pueden calcular la cantidad adecuada de fertilizante nitrogenado. La robustez del sistema se evaluó a través de la implementación del análisis de sensibilidad. Assimakopoulos, Kalivas, & Kollias, (2003) propusieron una metodología de clasificación difusa y el uso de un sistema de información geográfica para cartografiar los suelos agrícolas de acuerdo con el tipo y la tasa de aplicación de N-fertilizante que se debe usar. Prabakaran, Vaithianathan, & Ganesan, (2018) diseñan un SEAD difuso para mejorar la productividad de los cultivos y el uso eficiente de los fertilizantes. En otro trabajo, Tremblay et al., (2010) diseñaron enfoques de lógica difusa para calcular las tasas de N correctas con el apoyo de imágenes de sensores remotos.

Recientemente, la literatura reporta un sistema experto difuso para estimar la cantidad apropiada de N en los campos de arroz (Abd Razak, Abdul-Rahman, Mutalib, & Abd Aziz, 2017). Un sistema de inferencia difuso para el requisito de N para el cultivo de la uva (More, Kashid, & Jadhav, 2016). Enfoque de lógico difuso para un sistema de predicción de tasas de urea correctas (Khaire, Padole, Bore, Koli, & Kulkarni, 2017). Sistemas difusos para el diagnóstico de deficiencia de nutrientes en las hojas de la caña de azúcar y sistemas que evalúan el nivel de color de la hoja para aplicar la tasa correcta de fertilizante (Jadhav, Yelapure, & Babar, 2012). Sistemas difusos para optimizar la fertigación en el cultivo de fresas (de la Torre, Grande, Aroba, & Andujar, 2005) y soft computing para los cultivos de horticultura de fertigación (Nirosha & Srinivasan, 2015). El objetivo de esta investigación es desarrollar un SEAD que ayude a los agricultores, administradores y supervisores de los campos agrícolas de caña de azúcar a estimar la tasa correcta de fertilizantes NPK.

4.3.3 Desarrollo del sistema experto de apoyo a la decisión en fertilización NPK

Los SEAD basados en lógica difusa son eficientes en muchas áreas de aplicación; sin embargo, aunque son eficientes, en ocasiones se desconfía de ellos porque se basan completamente en la experiencia. Por lo tanto, se están buscando nuevas estrategias para mejorarlos y obtener resultados más precisos. Una de las consideraciones más importantes al diseñar un sistema difuso es definir la arquitectura de las funciones de membresía (FM) de cada conjunto difuso. En la mayoría de las aplicaciones existentes, el diseño de las FM se realiza tradicionalmente, es decir, el grupo de expertos diseña las FM, definen los parámetros según sus criterios o según los manuales o las guías prácticas. La estrategia para mejorar estos sistemas consiste en aplicar intervalos de confianza (IC) a las funciones de membresía trapezoidal. Con esta mejora, se localiza el promedio de la muestra en el intervalo y la precisión aumenta para obtener mejores rendimientos en los resultados del sistema. Por lo tanto, el uso de un SEAD basado en lógica difusa y mejorado en la arquitectura de las FM puede cumplir objetivos tales como mejorar el desempeño ambiental, mejorar los rendimientos y minimizar el costo y uso de fertilizantes.

El diseño y la validación del SEAD se realizó con el asesoramiento de dos grupos de expertos: El grupo de expertos número 1 (GE1) se encargó de diseñar el SEAD. Los expertos en este grupo son ingenieros agrónomos que trabajan en una empresa que siembra caña de azúcar para el Ingenio San Pedro. El grupo de expertos 2 (GE2) son ingenieros agrónomos y expertos en edafología, y se encargaron de realizar pruebas para detectar posibles errores en el SEAD. Todos los expertos tienen más de 20 años de experiencia en el cultivo y la cosecha de caña de azúcar. Además, participaron los agricultores con más experiencia y que han obtenido mejores rendimientos de caña de azúcar en sus campos. Los modelos de lógica difusa se desarrollaron en el toolbox del software LABVIEW y la metodología aplicada en este trabajo de investigación toma el siguiente orden.

4.3.3.1 Variables del SEAD

Las variables utilizadas en ambos modelos se seleccionaron a partir de un análisis exhaustivo realizado con los expertos. En el modelo CED-M, se incluyen las siguientes variables: La conductividad eléctrica (CE) es una medida del potencial osmótico del agua. El agua salada en

la zona de la raíz reduce la absorción de nutrientes y afecta el rendimiento de los cultivos. En este estudio, esta variable se mide en deciemens por metro (dS m⁻¹) (Barradas, Dida, Matula, & Dolezal, 2018). El pH del suelo puede estimar la disponibilidad de nutrientes esenciales y la toxicidad de otros elementos. En general, la disponibilidad de elementos minerales disminuye a medida que aumenta el pH (Thomas, 1996). La materia orgánica del suelo (MOS) consiste en una gama de fragmentos orgánicos y elementos microbianos de varios tamaños en varias etapas de descomposición. Una característica esencial de la MOS es que retiene nutrientes y contaminantes en el suelo, lo que mejora el crecimiento de las plantas. El contenido de MOS se mide como un porcentaje (%) (Lehmann & Kleber, 2015). La clase textural del suelo (CTS), es una propiedad física valiosa del suelo que afecta la actividad microbiana al afectar directamente el contenido de agua, la temperatura del suelo y también afecta la fertilidad del suelo. En esta investigación, la variable se clasifica de la siguiente manera: arcilla, franco-arcilloso, franco, franco-arenoso y arenoso (Vinhai-Freitas, Corrêa, Wendling, Bobul'ská, & Ferreira, 2017). El índice de anegamiento (IAN) es uno de los estreses abióticos que limitan la productividad potencial de los cultivos. El IAN convierte el entorno aeróbico en un entorno anaeróbico, y afecta el crecimiento y el funcionamiento de las raíces. El índice de riesgo de tener condiciones extendidas de anegamiento se mide como un porcentaje (%) (Gomathi, Gururaja Rao, Chandran, & Selvi, 2014). En este modelo la variable de salida se nombró condición edáfica. Esta variable se clasifica entre 0 y 100, donde 0 representa las peores condiciones para el crecimiento de la caña de azúcar y 100 representa las mejores condiciones.

Las variables elegidas para el modelo NPK-M son las siguientes: La variable Condición edáfica; esta es la variable de salida del primer modelo (CED-M) y alimenta este segundo modelo. El rendimiento esperado de caña (REC), el rendimiento depende del clima, la condición del suelo, la variedad de caña de azúcar utilizada y el uso de nutrientes y productos que previenen las plagas y enfermedades en la caña de azúcar. Los rendimientos en México oscilan alrededor de 72 ton/ha, mientras que el promedio mundial es superior a 80 ton/ha. En este estudio, esta variable se mide en toneladas de caña de azúcar producida por hectárea (ton/ha) (CONADESUCA, 2016c). Macronutrientes NPK disponibles en el suelo; la acumulación de macronutrientes NPK en los ecosistemas agrícolas todos los días se está volviendo importante porque permite conocer el estado de los nutrientes en el suelo, el flujo de

los nutrientes, la tasa de agotamiento y el desarrollo de mejores estrategias para la gestión de los nutrientes. La disponibilidad de macronutrientes en el suelo se mide en kilogramos por hectárea (kg/ha) (Pathak, Mohanty, Jain, & Bhatia, 2010).

La elección de las variables en ambos modelos se hizo apoyándose en diferentes aspectos. En el modelo CED-M, las variables CE, pH y MOS determinan si los nutrientes están fácilmente disponibles en el suelo. Las variables CTS y IAN proporcionan información sobre los indicadores de fertilidad según la clase de textura y el contenido de agua del suelo. En el modelo NPK-M, la variable Condición edáfica representa el comportamiento de las propiedades físicas y químicas del suelo. La variable REC es un indicador del rendimiento de caña de azúcar que el agricultor desea obtener en sus campos. Finalmente, se seleccionaron como variables de entrada en el SEAD, la disponibilidad de macronutrientes N, P y K.

4.3.3.2 Arquitectura de las variables del SEAD

La arquitectura de las variables de entrada y salida se desarrolla de dos maneras, la primera opción es la forma tradicional, donde la arquitectura es diseñada por los ingenieros agrónomos. En esta opción, se incluyeron variables de entrada como CE, CTS del CED-M. En el modelo NPK-M, se incluyeron variables de entrada como REC y la Condición Edáfica.

En la segunda opción se utilizan IC; los IC apoyan el diseño de la arquitectura de las FM a través de la estimación de los rangos (inferior y superior) donde se encuentra la media de la muestra. Los IC se utilizaron en variables de entrada como pH, MOS e IAN del modelo CED-M. En el modelo NPK-M, se utilizaron IC en la disponibilidad de N, P y K. Para aplicar los IC, se recolectó una muestra de 120 datos (para cada una de las variables). Esta información se analizó con pruebas de normalidad (Anderson-Darling y Ryan-Joiner) con el software MINITAB 14. En estas pruebas, el supuesto de normalidad indica que el valor de $p > 0.05$ y el coeficiente de correlación deben estar cerca de 1, en las variables mencionadas anteriormente las pruebas cumplen con esta restricción. A continuación, en la Figura 4.7, se muestra un ejemplo de los resultados de la prueba de normalidad de las variables de pH, MOS e IAN del modelo CED-M.

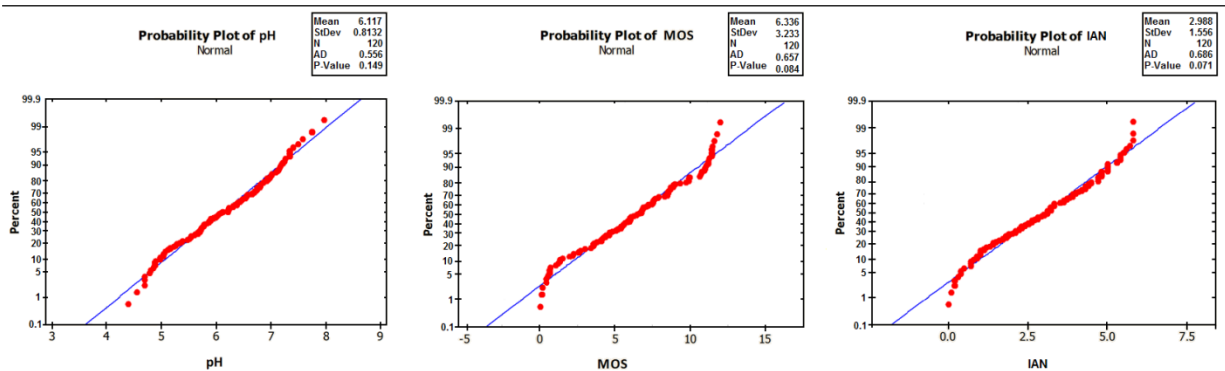


Figura 4.7 Fracción de pruebas de normalidad de las variables del modelo CED-M.

En el anexo 1, Figura 1.a y 1.b de este documento, se pueden observar las gráficas de las pruebas de normalidad realizadas a las variables del modelo NPK-M. Después de evaluar cuales fueron las variables que siguen una distribución normal, el siguiente paso es aplicar los IC a las variables que cumplen esa restricción. En la Tabla 4.6, se describen los IC de las variables de entrada (los IC se observan en negrita).

Tabla 4.6 Parámetros de las variables y estimación de los IC.

Variable pH del modelo CED-M										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LI	LIU	LSU	LS
Acido	28	5	0.28	0.05	2.052		4	4.9	5.1	5.7
Adecuado	49	6	0.29	0.05		1.645	5.5	5.9	6.1	6.8
Alcalino	43	7	0.34	0.05		1.645	6.5	6.9	7.1	8

Variable N del modelo NPK-M										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LI	LIU	LSU	LS
Bajo	23	13.1	4.10	0.05	2.074		5	11.3	14.8	20
Medio	90	30.2	7.53	0.05		1.645	18	28.9	31.5	50
Alto	7	54.2	3.40	0.05	2.447		45	51	57.3	60

Abreviaturas en la tabla: n, tamaño de muestra; LI, Límite inferior; LIU, Límite inferior unilateral; LSU, Límite superior unilateral; LS, Límite superior.

Los IC para las variables restantes se pueden observar en el anexo 1, Tabla 1.a y 1.b de este documento. A continuación en la Figura 4.8, se observan los rangos de la variable pH obtenidos por los IC. El límite inferior unilateral y el límite superior unilateral se calcularon con IC. Las ecuaciones de los IC se encuentran en los anexos, Ec. a1-Ec. a7.

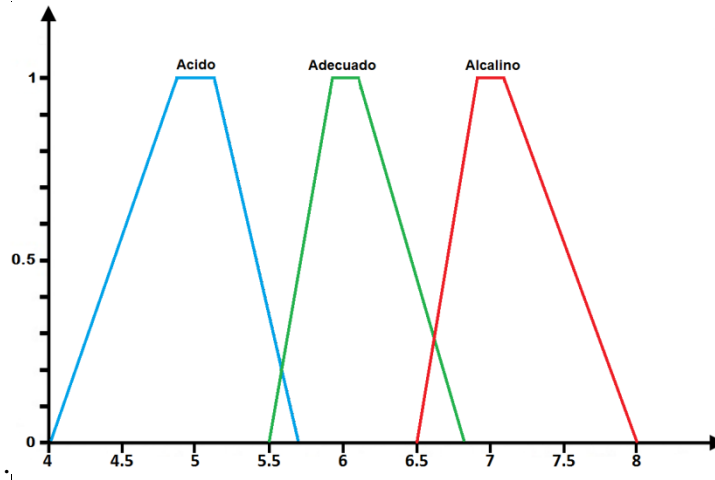


Figura 4.8 Función de membresía e IC de la variable pH (CED-M).

A continuación, en las ecuaciones 4.9, 4.10 y 4.11, se describe un ejemplo del modelado matemático para las FM de la variable pH.

$$\mu_{Acido}(pH) = \begin{cases} 0; & x < 4 \\ 1 - \frac{4.9-x}{4.9-4}; & 4 \leq x \leq 4.9 \\ 1; & 4.9 \leq x \leq 5.1 \\ 1 - \frac{x-5.1}{5.7-5.1}; & 5.1 \leq x \leq 5.7 \\ 0; & x \geq 5.7 \end{cases} \quad \text{Ec 4.9}$$

$$\mu_{Adecuado}(pH) = \begin{cases} 0; & x < 5.5 \\ 1 - \frac{5.9-x}{5.9-5.5}; & 5.5 \leq x \leq 5.9 \\ 1; & 5.9 \leq x \leq 6.1 \\ 1 - \frac{x-6.1}{6.8-6.1}; & 6.1 \leq x \leq 6.8 \\ 0; & x \geq 6.8 \end{cases} \quad \text{Ec 4.10}$$

$$\mu_{Alcalino}(pH) = \begin{cases} 0; & x < 6.5 \\ 1 - \frac{6.9-x}{6.9-6.5}; & 6.5 \leq x \leq 6.9 \\ 1; & 6.9 \leq x \leq 7.1 \\ 1 - \frac{x-7.1}{8-7.1}; & 7.1 \leq x \leq 8 \\ 0; & x \geq 8 \end{cases} \quad \text{Ec 4.11}$$

La arquitectura de las FM y la elección de los rangos se realizaron con el conocimiento obtenido de los expertos. Las FM utilizadas en estos modelos son trapezoidal y singleton. En las Tablas 4.7 y 4.8, se describen los parámetros de las variables de entrada y salida de los dos modelos.

Tabla 4.7 Variables en el modelo CED-M.

Variables de entrada	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalo
CE	Adecuado	Trapezoidal	(0.1, 0.8, 1.4, 2)
	No-adequado	Trapezoidal	(1.6, 3, 4, 5.5)
pH	Acido	Trapezoidal	(4, 4.9, 5.1, 5.7)
	Adecuado	Trapezoidal	(5.5, 5.9, 6.1, 6.8)
	Alcalino	Trapezoidal	(6.5, 6.9, 7.1, 8)
MOS	Bajo	Trapezoidal	(0, 0.9, 1.7, 3.4)
	Normal	Trapezoidal	(3, 4.8, 5.3, 7)
	Alto	Trapezoidal	(6.5, 8.7, 9.4, 12)
CTS	Arcilloso	Singleton	(1)
	Franco-arcilloso	Singleton	(2)
	Franco	Singleton	(3)
	Franco-arenoso	Singleton	(4)
	Arenoso	Singleton	(5)
IAN	Bajo	Trapezoidal	(0, 0.4, 0.8, 1)
	Alto	Trapezoidal	(0.8, 3.2, 3.6, 6)
Variable de salida			
Condición edáfica	Muy malo	Trapezoidal	(1, 10, 20, 30)
	Malo	Trapezoidal	(25, 35, 45, 55)
	Regular	Trapezoidal	(50, 60, 70, 75)
	Bueno	Trapezoidal	(70, 75, 80, 90)
	Muy bueno	Trapezoidal	(88, 90, 95, 100)

Tabla 4.8 Variables en el modelo NPK-M.

Variables de entrada	Etiqueta lingüística	Función de membresía	Intervalo
Condición edáfica	Muy mala	Trapezoidal	(1, 10, 20, 30)
	Mala	Trapezoidal	(25, 35, 45, 55)
	Regular	Trapezoidal	(50, 60, 70, 75)
	Buena	Trapezoidal	(70, 75, 80, 90)
	Muy buena	Trapezoidal	(88, 90, 95, 100)
REC	Bajo	Trapezoidal	(20, 35, 50, 65)
	Medio	Trapezoidal	(60, 68, 73, 80)
	Alto	Trapezoidal	(75, 95, 115, 150)
N	Bajo	Trapezoidal	(5, 11.3, 14.8, 20)
	Suficiente	Trapezoidal	(18, 28.9, 31.5, 50)
	Alto	Trapezoidal	(45, 51, 57.3, 60)
P	Bajo	Trapezoidal	(0, 7.4, 10.7, 12)
	Suficiente	Trapezoidal	(10, 20.2, 22.5, 30)
	Alto	Trapezoidal	(25, 38, 40.9, 60)
K	Bajo	Trapezoidal	(10, 36.6, 51.4, 80)
	Suficiente	Trapezoidal	(70, 117.4, 128.1, 160)
	Alto	Trapezoidal	(150, 195.3, 208.7, 210)
Variables de salida			
Tasa de N	Muy bajo	Trapezoidal	(20, 27, 34, 40)
	Bajo	Trapezoidal	(35, 40, 45, 50)
	Medio bajo	Trapezoidal	(45, 55, 60, 65)
	Medio	Trapezoidal	(60, 75, 85, 100)
	Medio alto	Trapezoidal	(95, 120, 155, 170)
	Alto	Trapezoidal	(160, 180, 200, 220)
	Muy alto	Trapezoidal	(210, 250, 280, 300)
Tasa de P	Muy bajo	Trapezoidal	(0, 3, 7, 20)
	Bajo	Trapezoidal	(18, 20, 25, 45)
	Medio bajo	Trapezoidal	(40, 47, 54, 60)
	Medio	Trapezoidal	(50, 60, 67, 77)
	Medio alto	Trapezoidal	(74, 83, 95, 110)
	Alto	Trapezoidal	(100, 125, 135, 150)
	Muy alto	Trapezoidal	(145, 160, 185, 200)
Tasa de K	Muy bajo	Trapezoidal	(0, 3, 7, 20)
	Bajo	Trapezoidal	(18, 20, 25, 45)
	Medio bajo	Trapezoidal	(40, 47, 54, 60)
	Medio	Trapezoidal	(50, 60, 67, 77)
	Medio alto	Trapezoidal	(74, 83, 95, 110)
	Alto	Trapezoidal	(102, 127, 139, 150)
	Muy alto	Trapezoidal	(140, 165, 185, 200)

4.3.3.3 Reglas de inferencia difusa

En esta sección, se utiliza el método de aprendizaje IF-THEN en las reglas de inferencia difusa. Estas reglas se formulan a partir de la relación de entrada-salida de las variables y con el apoyo de los ingenieros agrónomos del GE1. Las reglas difusas funcionan de la forma precedente - consecuente. A continuación, se describen algunos ejemplos de reglas de inferencia de ambos modelos.

Ejemplo 1 de la CED-M, regla de inferencia No. 47:

IF (CE es adecuada), AND (pH es adecuado), AND (MOS es normal), AND (CTS es Francoarenoso), AND (IAN es bajo), THEN (la Condición edáfica es regular)

Ejemplo 2 del modelo NPK-M, regla de inferencia No. 193:

IF (Condición edáfica es regular), AND (REC es medio), AND (N es bajo), AND (P es suficiente), AND (K es bajo), THEN (La tasa de N es alta), (La tasa de P es muy baja), (La tasa de K es media)

En el modelo CED-M se obtuvieron 180 reglas de inferencia, y en el modelo NPK-M se obtuvieron 405 reglas de inferencia. En las ecuaciones 4.12 y 4.13, se muestra el total de reglas difusas para los modelos CED-M y NPK-M, respectivamente.

$$CED - M = CE(2) \times pH(3) \times MOS(3) \times CTS(5) \times IAN(2) = 180 \quad \text{Ec 4.12}$$

$$NPK - M = Condicion\ edafica(5) \times REC(3) \times N(3) \times P(3) \times K(3) = 405 \quad \text{Ec 4.13}$$

Con la ayuda de los expertos se verificaron las reglas de inferencia para corregir aquellas reglas similares, inadecuadas o inactivas e inconsistentes. Sin embargo, el análisis no mostró resultados negativos o reglas afectadas por el ruido contenido en las variables de entrada-salida. Por lo tanto se validó el total de las reglas difusas, sin omitir ninguna regla o conjuntos de reglas ya que cada una de ellas tiene posibilidad de ocurrencia en el modelo.

4.3.3.4 Pruebas

La etapa de pruebas consistió en preparar cuestionarios y aplicarlos al GE2 para realizar la validación. El GE1 diseñó los modelos difusos, sin embargo, este grupo de expertos no se utilizó para realizar las pruebas, debido a que podría implicar un sesgo de los modelos hacia la realidad de este grupo de profesionales y probablemente los resultados coincidirían en aproximadamente el 100%. Por lo tanto, el GE2 fue requerido para realizar las pruebas, ya que estos expertos no diseñaron el SEAD ni lo utilizaron en la práctica habitual. Los resultados obtenidos por GE2 proporcionan una base para la comparación con los resultados obtenidos por el SEAD y los obtenidos por los análisis de suelo. La razón es que estos profesionales tienen suficiente experiencia en el campo de la agronomía y la edafología.

En el modelo CED-M, solo se comparan los resultados obtenidos por los expertos y los obtenidos por el modelo difuso. Los resultados obtenidos en el modelo NPK-M se comparan con los obtenidos por el SEAD y los obtenidos por los análisis del suelo. En ambos modelos, se aplicaron 160 pruebas para encontrar los grados de error. Los análisis de suelos fueron realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, laboratorios privados de Guadalajara, México, y una fracción de estudios realizados por el Colegio de Posgraduados Campo Córdoba.

Los resultados obtenidos por los análisis de suelos a menudo generan un diagnóstico que se utiliza para formular los requisitos de fertilización para lograr el rendimiento potencial esperado. Los análisis de suelo utilizados en este estudio recopilan los mismos datos analíticos que se implementan en el SEAD; en consecuencia, se pueden comparar adecuadamente. Todos los estudios se realizan en el país de México entre los años 2011 y 2017. En las Tablas 4.9 y 4.10, se observa la fracción de las pruebas realizadas con los dos modelos.

Tabla 4.9 Fracción de pruebas llevadas a cabo con el modelo CED-M.

No. of tests	CE (dS/m-1)	pH	MOS (%)	CTS	IAN (%)	Condición edáfica estimada por el GE2	Condición edáfica estimada por el modelo difuso CED-M
1	1.4	6.5	4.4	5	0.2	55	63.0
2	1.6	5.9	3.1	4	1.7	20	21.2
3	0.2	5.7	6.0	3	2.3	70	79.8
4	0.4	6.7	6.9	1	4.8	55	47.6
5	1.1	6.9	6.7	2	3.7	35	23.8
6	5.4	5.6	7.6	3	5.5	35	37.3
7	4.5	6.5	4.6	1	5.8	45	39.9
8	0.6	6.7	3.4	1	4.7	20	25.1
9	0.2	6.2	5.5	2	3.9	65	79.8
10	0.5	5.0	3.0	2	3.2	10	15.4
11	0.5	5.6	11.6	5	0.7	35	38.7
12	4.0	5.8	11.6	1	5.5	55	39.8
13	1.4	7.9	0.7	1	0.4	35	39.8
14	1.5	6.1	10.7	2	0.3	97	93.9
15	1.2	6.2	8.5	3	2.9	70	63.4

Tabla 4.10 Fracción de pruebas llevadas a cabo con el modelo NPK-M.

No. de pruebas	Condición edáfica	REC (ton/ha)	Nutrientes disponibles (kg/ha)			Tasas calculadas por análisis de suelos (kg/ha)			Tasas calculadas por el SEAD (kg/ha)			Tasas calculadas por el GE2 (kg/ha)		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
1	63	52	26.6	23.7	197.6	66	6	18	80	8.38	28.6	75	12	25
2	21.2	83	5.5	3.7	165.3	210	115	98	225	125	92	215	120	95
3	79.8	68	34.1	51.6	125.3	32	15	65	42.5	9.13	50.1	40	12	55
4	47.6	42	26.7	32.8	196.9	50	6	8	55.7	8.7	8.7	60	12	12
5	23.8	121	22.2	24.5	232.7	150	45	50	133	30.2	63.5	145	35	55
6	37.3	120	18.2	15.7	163.9	240	40	85	250	47.8	90.2	255	50	80
7	39.9	51	70.1	11.4	138.4	25	10	25	30.2	25.9	33.6	30	20	30
8	25.1	98	11.7	48.2	230.8	185	55	75	190	49.6	90.9	195	45	85
9	79.8	42	24.9	32.5	21.5	65	10	50	55.4	9.2	30	50	15	40
10	15.4	149	53.6	14.9	62.1	85	35	130	80.2	32	126	75	28	120
11	38.7	120	49.1	29.2	41.4	150	12	100	92.6	9.5	127	110	15	95
12	39.8	51	70.1	11.4	138.4	25	10	25	30.2	25.9	33.6	30	20	30
13	39.8	149	53.6	14.9	62.1	85	35	130	80.2	10	126	75	28	120
14	93.9	40	13.1	45.9	123.1	65	10	10	55.6	9	9	60	12	12
15	63.4	52	26.6	23.7	197.6	70	6	18	80	8.4	28.6	75	12	25

Las tasas calculadas por los análisis de suelo están supervisadas por la norma mexicana NOM 021 RECNAT 2000 AS. Las pruebas obtenidas de los análisis de suelos fueron elegidas por

los expertos, de modo que las tasas fueron consistentes para compararlas con los resultados del SEAD y la experiencia del GE2.

4.4 Etapa 3. Optimización de los impactos ambientales

La propuesta consiste en desarrollar una estrategia metodológica en la que se utilice ACV, SMC y OMAG, con el propósito de minimizar los impactos ambientales en la cadena de suministro del azúcar de caña. La SMC apoya en el análisis de incertidumbre con distribuciones de probabilidad (en las 4 etapas), posterior a este paso, los parámetros del modelo serán introducidos al Software SimaPro como valores puntuales para que evalúen los impactos. Después de ser evaluados, el modelo matemático se optimiza en las diferentes funciones objetivo. El desarrollo de esta metodología aporta un modelo matemático que evalúa impactos ambientales y es capaz de optimizar esos impactos para reducirlos. La Figura 4.9 describe la metodología propuesta.

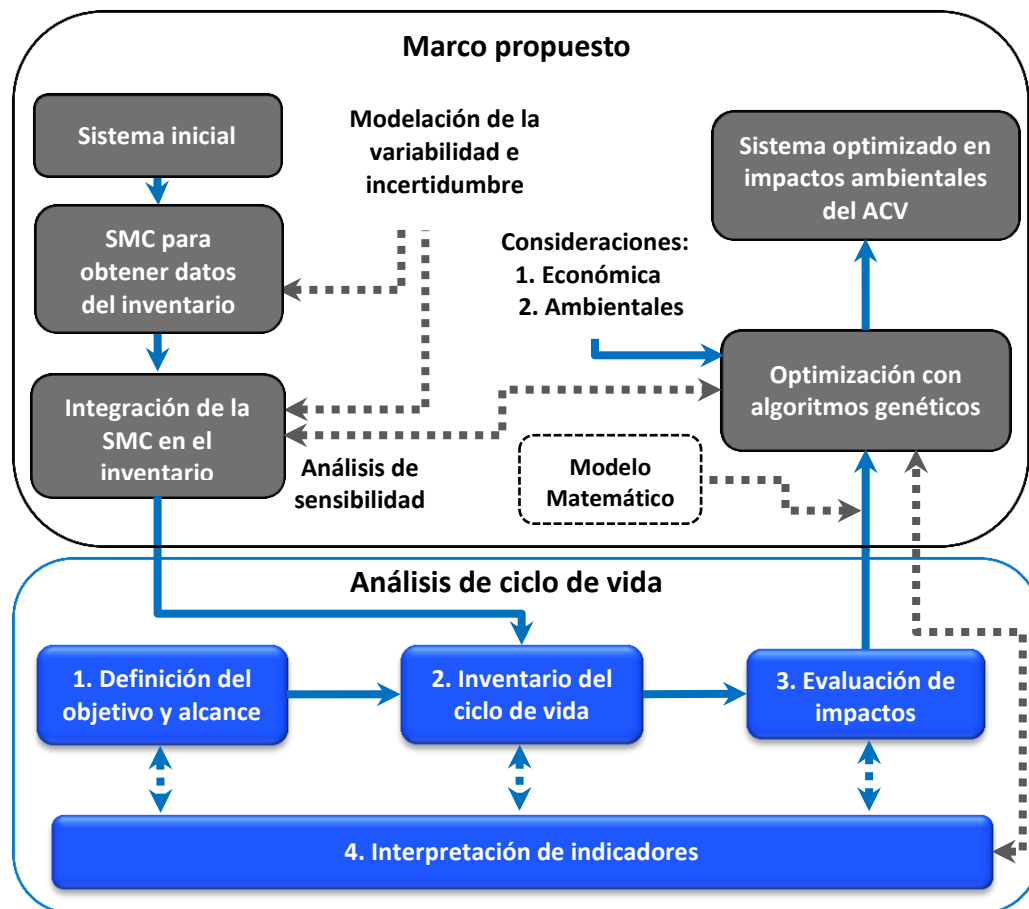


Figura 4.9 Metodología propuesta que integra, ACV, SMC y OMAG.

4.4.1 Introducción

La conciencia ambiental de las personas ha aumentado en las últimas décadas, y la demanda de productos amigables con el medio ambiente ha hecho que los agro-científicos presten más atención a una producción más limpia. El ACV se ha identificado como una herramienta adecuada para evaluar los impactos ambientales asociados con un producto a lo largo de su ciclo de vida. La implementación del ACV con otras herramientas de gestión puede ayudar a los profesionales del ACV a evaluar los sistemas agroalimentarios desde diferentes puntos de vista (Khoshnevisan et al., 2015).

4.4.2 Estado del arte

Con respecto a la minimización de impactos ambientales, diferentes trabajos de investigación se han desarrollado en diferentes áreas disciplinarias; al respecto Komly et al., (2012) desarrollan un modelo matemático consiste en encontrar los valores que minimizan los impactos ambientales del sistema de administración de desperdicios del PET. Morales-Mendoza (2013) desarrolla un modelo de optimización multiobjetivo para el eco-diseño de procesos químicos. Khoshnevisan et al., (2015) desarrollan un modelo a partir de los resultados del ACV, con el objetivo de evaluar tres categorías de impacto sobre el impacto ambiental de los sistemas agrícolas. Perez-Gallardo, Azzaro-Pantel, Astier, Domenech, & Aguilar-Lasserre (2014) generan alternativas óptimas de configuración de celdas fotovoltaicas por medio de la optimización multiobjetivo, estas alternativas se basan en los principios del eco diseño y consideran de manera simultánea los aspectos técnico-económicos y ambientales. Wang, Zmeureanu, & Rivard (2005) desarrollan un modelo que permite encontrar el costo mínimo del ciclo de vida, con el objetivo de ayudar a los diseñadores a tomar decisiones rentables para el diseño de edificios ecológicos. Dufo-López et al., (2011) utilizan un algoritmo de optimización multiobjetivo en un sistema fotovoltaico eólico-diésel independiente con almacenamiento de batería, con el objetivo de minimizar el costo normal de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) equivalente del ciclo de vida.

4.4.3 La SMC como herramienta previa a la optimización multiobjetivo

La SMC en la producción de azúcar de caña ha tenido un alcance limitado, solo dos trabajos se han realizado en la actualidad en esta área de investigación. Tal es el caso de Renouf, Pagan,

& Wegener (2011) que proponen el uso de SMC para analizar el crecimiento de la caña de azúcar y evaluar impactos como el CG y los MJ primary; con el objetivo de examinar el enfoque preferido para asignar impactos a los múltiples productos del procesamiento de la caña y la influencia que la variabilidad en el cultivo de la caña tiene sobre los resultados. En el trabajo de Seabra et al., (2011a) utilizan SMC para medir la incertidumbre de las emisiones del ciclo de vida del etanol, basado en la distribución asignada de curvas de probabilidad para once parámetros seleccionados e informados por datos estadísticos parciales disponibles en la industria; el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de la energía del ciclo de vida y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la caña de azúcar y el etanol, teniendo en cuenta el exceso de bagazo y la electricidad como co-productos.

En este caso de estudio, las distribuciones que no son triangulares fueron ajustadas en el módulo Distribution Fitting (Fit Distribution to data) utilizando las pruebas de bondad de ajuste con los estadísticos Chi-cuadrada, Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov.

4.4.3.1 Simulación Monte Carlo de la agricultura de caña

La caña de azúcar se cultiva en campos de la región Papaloapan-Tuxtla en un área aproximada de 19000 ha. Los campos de cultivo se encuentran en un promedio de 25 mts sobre el nivel del mar, con un buen nivel de humedad y una concentración de sacarosa adecuada (11%). La agricultura de caña requiere de recursos como los agroquímicos, el uso de combustibles fósiles y recursos naturales como el agua. Los agroquímicos permiten el crecimiento de la caña en condiciones adecuadas, sin embargo, su producción y aplicación en los suelos cañeros trasciende en problemas ambientales serios que en la actualidad están teniendo repercusiones fuertes en esta región. Todos los recursos utilizados en la agricultura de caña de azúcar son modelados con incertidumbre para llevar a cabo una optimización multiobjetivo y así minimizar los impactos en el ambiente generados por esta etapa. En la Tabla 4.11 se muestran los parámetros inciertos evaluados en el modelo de la agricultura de caña. En la Tabla 4.12 se muestran salidas del modelo de la agricultura de caña de caña de azúcar.

Tabla 4.11 Entradas en el modelo de SMC para la agricultura de caña

Entradas		Distribuciones en el modelo	Unidad
Rendimientos			
Producción esperada (ton/ha)		RiskLogistic(65.7324,5.3922)	ton/ha
Fertilizantes NPK			
Requerimiento del cultivo (kg/ha)	<i>N</i>	RiskBetaGeneral(0.15978,0.20207,1.5,1.7)	kg/ha
	<i>P</i>	RiskExtvalue(1.38988,0.18615)	kg/ha
	<i>K</i>	RiskExtvalue(1.04106,0.18556)	kg/ha
Porcentaje del nutriente en siembra	<i>N</i>	RiskLogistic(0.356524,0.012074)	%
	<i>P</i>	RiskBetaGeneral(0.36918,0.48281,0.237,0.385)	%
	<i>K</i>	RiskExtvalue(0.199708,0.015064)	%
Pesticidas			
Chinche salivosa		RiskTriang(0.5,1, 1.4)	%
Barrenadores del tallo		RiskTriang(0.2, 1, 1.5)	%
Plagas de la raíz		RiskTriang(0.1, 0.7, 0.9)	%
Rata de campo		RiskTriang(1.1, 1.6, 2.1)	%
Daño al cultivo causado		RiskTriang(1.6, 2.4, 2.9)	%
Costo del pesticida		RiskTriang(2, 3, 3.5)	%
Viento		RiskTriang(1.5, 2, 2.5)	%
Temperatura		RiskTriang(2.3, 3.1, 3.8)	%
Humedad		RiskTriang(1.2, 1.9, 3.8)	%
Estado general del equipo		RiskTriang(0.6, 1, 1.5)	%
Calibración adecuada (mochila, tractor)		RiskTriang(0.2, 1.5, 1.9)	%
Herbicidas			
Tipo de maleza		RiskTriang(5,6, 7)	%
Fase de crecimiento de la maleza		RiskTriang(1.1,1.5, 1.7)	%
Densidad de las malezas		RiskTriang(2.6, 4, 4.1)	%
Estado nutricional de la maleza		RiskTriang(10, 10.4, 10.7)	%
Tamaño de la maleza		RiskTriang(9, 10, 11)	%
Tipo suelo		RiskTriang(5, 6, 7)	%
Calidad del agua		RiskTriang(7, 7.2, 7.7)	%
Mezclas, procedimientos de aplicación y tiempos		RiskTriang(7, 7.5, 9)	%
Mantenimiento (Labores mecánicas)		RiskTriang(15, 16, 17)	%
Aplicador de herbicida individual		RiskTriang(13, 14, 15)	%
Estado de la humedad		RiskTriang(3, 4, 5)	%
Días desde la última lluvia de 5 mm		RiskTriang(2.3, 3.3, 4.7)	%
Temperatura		RiskTriang(5, 6, 7)	%
Combustible fósil (Diesel)			
1. Chapeo mecánico (máquina pequeña)		RiskWeibull(14.083,6.5878,RiskShift(0.63405)	l/hr
2. Subsuelo		RiskLogistic(9.90138,0.15527)	l/hr
3. Barbecha (voltar la tierra, arado)		RiskUniform(9.47353,10.42647)	l/hr
4. Rastro		RiskLognorm(1.5776,0.79211,RiskShift(8.1935)	l/hr
5. Rastra pulidora (dejar más fino el arado)		RiskUniform(7.6353,9.9647)	l/hr
6. Surcado		RiskUniform(9.6265,12.2735)	l/hr
7. Siembra		RiskWeibull(14.38,10.847,RiskShift(-2.8669)	l/hr
8. Pre-emergente (superficie pequeña se hace manual)		RiskLogistic(8.19863,0.38509)	l/hr
9. Primer cultivo:		RiskWeibull(7.9051,4.944,RiskShift(1.913)	l/hr
10. Fercultivo (Fertilización y cultivo)		RiskNormal(10.0286,1.0681)	l/hr
11. Segundo cultivo		RiskUniform(6.1588,7.6412)	l/hr
Pesticidas		RiskTriang(1.9,2.05,2.1)	l/hr
Herbicidas		RiskTriang(2.2,2.3,2.7)	l/hr
Fertilizantes		RiskTriang(5.2,5.9,6.3)	l/hr
Caña cosechada mecánicamente		RiskUniform(12.9471,14.8529)	l/hr
Cosecha levantada mecánicamente		RiskUniform(12.9471,14.8529)	l/hr
Densidad (kg/l)		RiskBetaGeneral(0.48248,0.4333,71.9,75.5)	kg/l
Conversión (MJ/kg)		RiskLoglogistic(41.9029,1.1218,3.7086)	MJ/Kg

Tabla 4.11 *Continuación*

Costos de la agricultura	Distribuciones en el modelo	Unidad
Costos de fertilizantes		
Sulfato de amonio	RiskBetaGeneral(0.22865,0.25644,6.534,9.98)	\$/kg
Urea	RiskExpon(1.06,RiskShift(5.7333))	\$/kg
DAP	RiskExtvalue(7.49018,0.088584)	\$/kg
Cloruro de potasio	RiskExpon(2.2851,RiskShift(4.6192))	\$/kg
Costos de pesticidas		
Klerat	RiskExtvalue(156.3242,5.8735)	\$/kg
Fosforo de aluminio	RiskBetaGeneral(0.22289,0.22289,50,60)	\$/kg
Costos de herbicidas		
Versatil	RiskExtvalue(0.091872,0.0031428)	\$/kg
Kator	RiskNormal(0.0318804,0.0027388)	\$/kg
Gesapax	RiskExtvalue(0.0114711,0.0020244)	\$/kg
Bazuca	RiskExtvalue(0.0119379,0.0019362)	\$/kg
Campero	RiskLogistic(0.0775638,0.0026291)	\$/kg
Costo de diésel (MXN)		
Diésel (PEMEX)	RiskLogistic(15.7461,1.1349)	\$/l

Tabla 4.12 Salidas del modelo para la agricultura de caña

Salidas	Unidad	Media	Desv. Est
Fertilizantes			
Urea	kg/ton caña	2.14	0.13
DAP (18-46-00)	kg/ton caña	0.94	0.22
Cloruro de potasio	kg/ton caña	1.84	0.38
Sulfato de amonio	kg/ton caña	1.79	0.29
Pesticidas			
Klerat	kg/ton caña	0.06376	0.00918
Fosforo de aluminio	kg/ton caña	0.00097	0.00014
Herbicidas			
Herbicidas	kg/ton caña	0.2183	0.0031
Combustible fósil			
Cosecha	kg/ton caña	2.48	0.047
Agricultura	kg/ton caña	1.28	0.035

La aplicación de fertilizantes se estima a partir de los requerimientos de nutrientes en la caña de azúcar. También influye el rendimiento esperado de caña de azúcar por hectárea. En las ecuaciones 4.14-4.21 se describen los modelos para obtener la cantidad de Urea (kg/ton caña) para la producción de caña de azúcar y los costos totales de los fertilizantes (los costos se calculan por Kg). Los parámetros de las tasas de fertilizantes se calculan en kilogramos por hectárea (kg/ha), excepto el requerimiento del cultivo que se calcula en kg/ton caña.

$$FT_N = \text{Producción esperada} * \text{Requerimientos del cultivo (kg/ton caña)} \quad \text{Ec 4.14}$$

$$FS_N = FT_N * \text{Porcentaje del nutriente en siembra} \quad \text{Ec 4.15}$$

$$FE_N = FT_N - FS_N \quad \text{Ec 4.16}$$

$$RN_s = \text{Porcentaje del elemento} * FS_N \quad \text{Ec 4.17}$$

$$RN_E = \text{Porcentaje del elemento} * FE_N \quad \text{Ec 4.18}$$

$$Tasa_{Fi(kg/ton\ caña)} = \frac{(RN_s + RN_E)}{\text{Rendimiento real por ha}} \quad \text{Ec 4.19}$$

$$Tasa\ Total_{Fi} = (RN_s + RN_E) * \text{superficie cosechada} \quad \text{Ec 4.20}$$

$$\text{Costo}\ Total_{Fi} = \text{Costo por kg del fertilizante}_i * Tasa\ Total_{Fi} \quad \text{Ec 4.21}$$

donde FT_N = requerimiento de fertilización del nutriente (puede ser N,P, o K) en kg/ha; FS_N = fertilización en siembra del nutriente (kg/ha); FE_N = fertilización en escarda del nutriente (kg/ha); RN_s = Requerimiento del nutriente en siembra; RN_E = Requerimiento del nutriente en escarda. Los porcentajes de los elementos se encuentran en la Tabla 4.3 de este capítulo;

$Tasa_{Fi(kg/ton\ caña)}$ = tasa del fertilizante tipo i; $Tasa\ Total_{Fi}$ = tasa total del fertilizante tipo i; $Costo\ Total_{Fi}$ = costo total del fertilizante tipo i.

Con respecto a la aplicación de fertilizantes en la superficie de cosecha, el modelo de SMC arrojó los siguientes resultados: la Urea obtuvo una media = 2.14 y una desviación estándar = 0.13 kg/ton caña; el DAP (18-46-00) obtuvo una media = 0.94 y una desviación estándar = 0.22 kg/ton caña; el Cloruro de potasio obtuvo una media = 1.84 y una desviación estándar = 0.38 kg/ton caña; y finalmente el Sulfato de amonio obtuvo una media = 1.79 y una desviación estándar = 0.29 kg/ton caña. Los resultados se observan en la Figura 4.10.

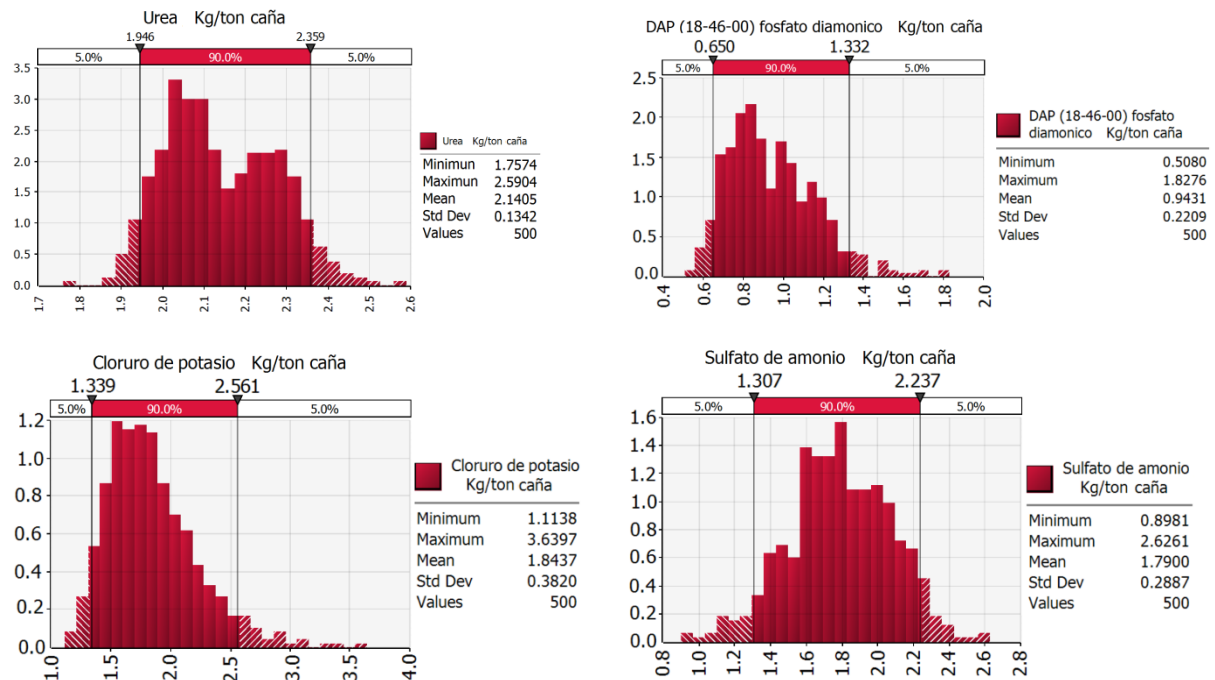


Figura 4.10 Resultados obtenidos en la aplicación de fertilizantes.

En la modelación, también se incluye el análisis de sensibilidad que evalúa a los factores que tienen mayor injerencia en los resultados de este proyecto. Para llevar a cabo este análisis se recurre a los gráficos de tornado, por medio de estos se estiman los factores que tienen mayor influencia en la aplicación de fertilizantes.

Los resultados del ACV muestran que el uso de Nitrógeno (N) tiene el mayor impacto ambiental de todo el estudio. Con respecto a esto, el análisis del gráfico de tornado muestra que en la Urea y el Sulfato de amonio tienen requerimientos de N en su aplicación. El requerimiento de nutrientes es variable ya que diferentes valores son utilizados por los agrónomos en los estudios de suelo. Es por lo anterior que la optimización multiobjetivo pueda llevarse a cabo tomando en cuenta este factor como variable de impacto. Los porcentajes de los nutrientes en siembra son factores que no se pueden modificar ya que estos son remanentes que quedaron en los suelos después de la cosecha. En la Figura 4.11 se observan los resultados del análisis de sensibilidad. El rendimiento esperado ton/ha también es variable y aunque tiene un impacto menor también sería importante tomarlo en cuenta para la optimización multiobjetivo.

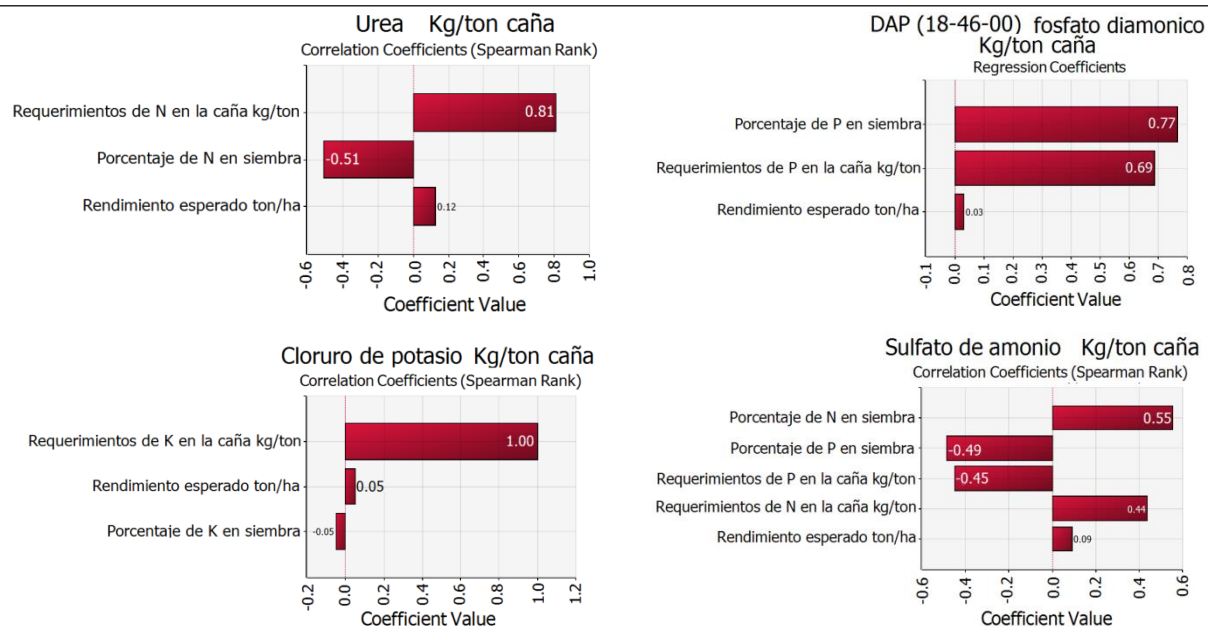


Figura 4.11 Gráfico de tornado de coeficientes de correlación en la aplicación de fertilizantes.

La aplicación de pesticidas en la agricultura de caña de azúcar es una práctica común de los agricultores que producen caña para este ingenio. A pesar de que este tipo de agroquímicos es eficiente para el control de plagas en estas áreas de cultivo, los agricultores no tienen conocimiento de los efectos peligrosos que pueden causar a su propia salud o a la de los habitantes de sus comunidades.

La modelación de esta etapa comienza con la estimación de la tasa de pesticidas por ha (aproximadamente 3.5 kg/ha), este cálculo es un valor constante que los agricultores han utilizado desde hace más de 10 años, sin embargo, esta tasa generalmente aumenta a poco más de 4 kg/ha debido a diferentes factores que afectan su incremento, entre los que destacan, el tipo de plaga, el daño causado al cultivo actualmente, los costos de los agroquímicos, los factores del medio ambiente y el estado actual de los equipos de aplicación. La información utilizada para el modelo en esta etapa fue proporcionada por los gerentes de campo del Ingenio San Pedro, y de la empresa Excelencia Cañera que se dedica exclusivamente a la agricultura de caña. La ecuación 4.22 representa el incremento en el pesticida debido a los porcentajes de contribución de cada uno de los factores anteriormente explicados. Los datos de los factores que incrementan las tasas de pesticidas se desglosan en la Tabla 4.11. En las ecuaciones 4.22 -

4.25 se describen los modelos que estiman la tasa del pesticida i y el costo total del uso de pesticidas.

$$IP_i = PCF + kg \text{ de pesticida } i \text{ aplicado por ha} \quad \text{Ec 4.22}$$

$$TR_{p-i} \text{ (kg/ton caña)} = \frac{3.5 \text{ kg/ha} + \text{Incremento de del pesticida } i \text{ en kg/ha}}{\text{Rendimiento real de toneladas de caña/ha}} \quad \text{Ec 4.23}$$

$$CT_{p-i} = TR_{p-i} \text{ (kg/ton caña)} * \text{Caña molida total} * \text{costo unitario por kg} \quad \text{Ec 4.24}$$

$$\text{Costo total de pesticidas} = CT_{p-i} + CT_{p-j} \quad \text{Ec 4.25}$$

donde IP_i = incremento del pesticida i ; PCF = porcentaje de contribución de factores, los factores llevan implícito los porcentajes de contribución por plagas, por daño actual, por costos, por factores del medio ambiente y por el estado actual de los equipos. Los parámetros de los factores se encuentran en la Tabla 4.11. TR_{p-i} (kg/ton caña) = tasa real del pesticida i en kg/ton caña; CT_{p-i} = costo total del pesticida i ; CT_{p-j} = costo total del pesticida j , la tasa real y el costo del pesticida j se calculan de la misma forma que se calcula la tasa del pesticida i . En la Figura 4.12 se observan los resultados de las salidas obtenidos por SMC, así también se observan los resultados del análisis de sensibilidad por el uso de pesticidas.

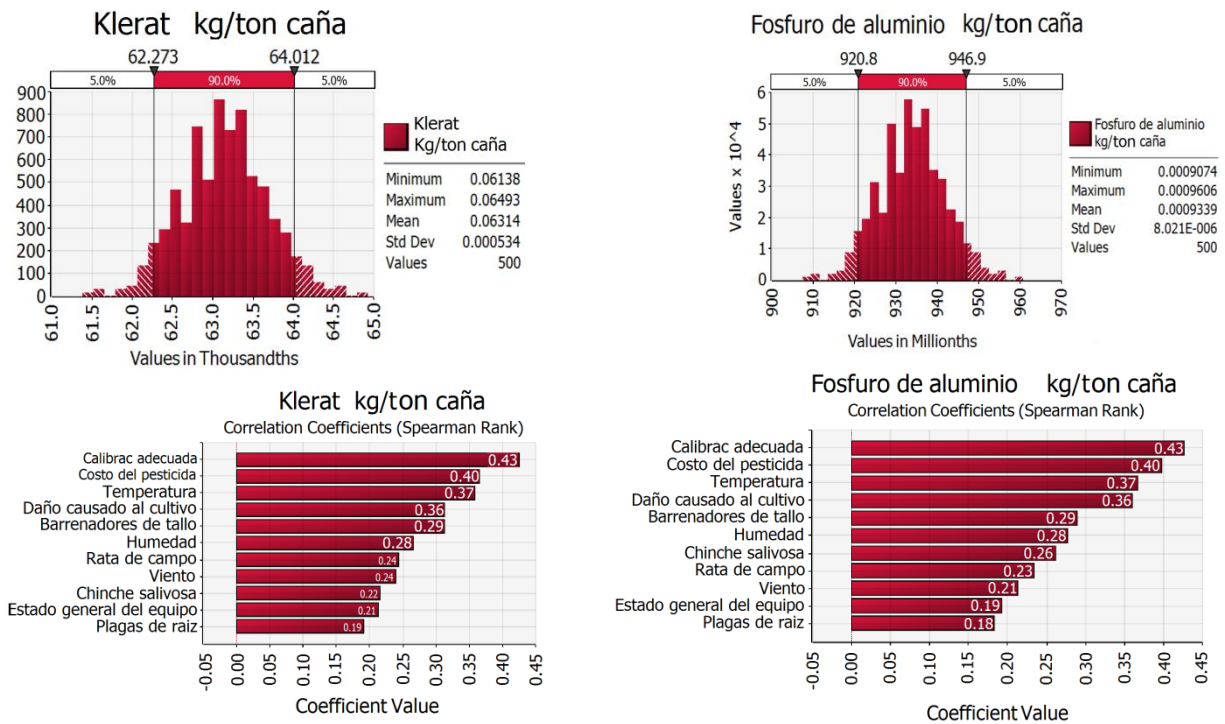


Figura 4.12 Resultados y gráfico de coeficiente de correlación por el uso de los pesticidas.

Los resultados de las tasas de pesticidas se observan en las Tabla 4.12. El análisis de sensibilidad muestra que los factores de Mantenimiento (labores mecánicas), el estado de humedad y las mezclas, procedimientos de aplicación y tiempos representan a los factores que mayor impacto tienen en el estudio. Desafortunadamente el estado de humedad es un factor no modificable ya que depende específicamente de las características climáticas de la región del Palaoapan-Tuxtlas.

Los herbicidas utilizados para el control de malezas se utilizan en cada época de siembra. Este producto agroquímico debe utilizarse con cuidado porque puede contaminar el ecosistema donde es depositado. Regularmente, en este ingenio se utiliza el herbicida de preemergencia (se aplica previo a la emergencia de maleza).

En los campos agrícolas, la tasa de herbicidas es de aproximadamente 1.5 kg/ha. La variación en esta tasa se debe a diferentes factores, entre los que destacan: factores propios de la maleza que pueden afectar las tasas de herbicidas (tipo de maleza, densidad de la maleza, etc.), otros factores pueden ser el tipo de suelo, la calidad del agua, el mantenimiento de los campos, etc. Todos los datos utilizados en la modelación fueron obtenidos de los campos del Ingenio San Pedro y de la empresa Excelencia Cañera. En la Tabla 4.13 se describen los porcentajes de contribución de cada uno de los factores incluidos en este modelo. En las ecuaciones 4.26 - 4.29 se muestran los modelos para el cálculo de la tasa de los herbicidas y sus costos.

$$IH_i = PCFH + \text{kg de pesticida } i \text{ aplicado por ha} \quad \text{Ec 4.26}$$

$$TR_{h-i} \text{ (kg/ton caña)} = \frac{1.5 \text{ kg/ha} + IH_i}{\text{Rendimiento real de toneladas de caña/ha}} \quad \text{Ec 4.27}$$

$$CT_{h-i} = TR_{h-i} \text{ (kg/ton caña)} * \text{caña molida total} * \text{costo unitario por kg de herbicida} \quad \text{Ec 4.28}$$

$$\text{Costo total de herbicidas} = CT_{h-i} + CT_{h-j} \quad \text{Ec 4.29}$$

donde IH_i = incremento del herbicida i ; $PCFH$ = porcentaje de contribución de los factores en la aplicación de herbicidas, los factores se clasifican como: tipo de maleza, densidad de la maleza, etc., otros factores pueden ser el tipo de suelo, la calidad del agua, el mantenimiento de los campos, todos los factores se describen en la tabla 4.11. $TR_{h-i} \text{ (kg/ton caña)}$ = tasa real

del herbicida i en kg/ton caña; CT_{h-i} = costo total del herbicida i ; CT_{h-j} = costo total del herbicida j . La tasa real y el costo del herbicida j se calculan de la misma forma que se calculan los indicadores del herbicida i . En la Figura 4.13 se observan los resultados de las salidas obtenidos por SMC, así también se observan los resultados del análisis de sensibilidad por el uso de pesticidas.

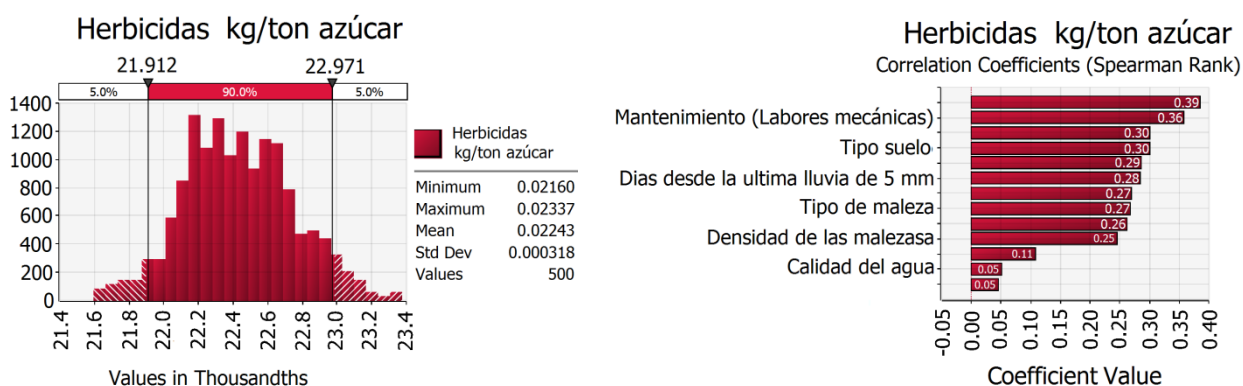


Figura 4.13 Resultados y gráfico de coeficientes de correlación por uso de herbicidas.

Los resultados de la estimación de las tasas de herbicidas se describen en la tabla 4.12. El gráfico de tornado muestra aquellos factores que tienen un impacto mayor en la salida del modelo, estos factores son el mantenimiento (labores mecánicas) y las mezclas, procedimientos de aplicación y tiempos, el factor estado de humedad también contribuye sin embargo no es un factor que pueda ser controlado para mejorarlo.

Las labores agrícolas requieren del uso de combustibles fósiles, el uso de diésel en la maquinaria agrícola es indispensable. Las actividades generalmente incluyen la preparación de las parcelas, la aplicación de agroquímicos, y la cosecha y el alzado de la caña. El uso de maquinaria agrícola puede ayudar a mejorar los rendimientos en la producción de azúcar, en los campos que producen caña las actividades que requieren del uso de diésel son el chapeo mecánico, el subsuelo, la barbecha, entre otras, y en menor medida la aplicación de agroquímicos como los pesticidas y herbicidas. Otras actividades más demandantes son la cosecha y el alzado mecánico de la caña de azúcar. En las ecuaciones 4.30-4.35 se describe el modelo matemático para el consumo de diésel y el costo total.

$$CDiesel_{PS} = \sum CM * Hr/ha + SSU * Hr/ha \dots \dots \dots + SCU * Hr/ha \quad \text{Ec 4.30}$$

$$CDiesel_{AA} = \sum P * Hr/ha + H * Hr/ha + F * Hr/ha \quad \text{Ec 4.31}$$

$$CDiesel_{COS} = \sum CME * Hr/ha + CLM * Hr/ha \quad \text{Ec 4.32}$$

$$\text{Consumo total de diesel} = CDiesel_{PS} + CDiesel_{AA} + CDiesel_{COS} \quad \text{Ec 4.33}$$

$$Diesel \left(\frac{kg}{ton \text{ de caña}} \right) = \frac{\text{Consumo total de diesel}}{\text{Rendimiento real de ton caña/ha}} * Densidad \left(\frac{kg}{l} \right) \quad \text{Ec 4.34}$$

$$\text{Costo total de dieel} = \text{Consumo total de diesel} * \text{caña molida total (ton)} * \text{costo (litro)} \quad \text{Ec 4.35}$$

donde $CDiesel_{PS}$ = litros de diésel consumidos en labores de preparación de suelo; CM = litros de diésel consumidos por hora en chapeo el mecánico; Hr/ha = número de horas por hectárea requeridas para llevar a cabo la labor o actividad con maquinaria agrícola en el campo; SSU = litros de diésel consumidos por hora en la actividad de subsuelo; SCU = litros de diésel consumidos por hora en la actividad de segundo cultivo. $CDiesel_{AA}$ = litros de diésel consumidos en labores de aplicación de agroquímicos; P = litros de diésel consumidos por hora en la aplicación de pesticidas; H = litros de diésel consumidos por hora en la aplicación de herbicidas; F = litros de diésel consumidos por hora en la aplicación de fertilizantes. $CDiesel_{COS}$ = litros de diésel consumidos en labores de cosecha; CME = litros de diésel consumidos por hora en la actividad de cosecha mecánica; CLM = litros de diésel consumidos por hora en la actividad de cosecha levantada mecánicamente. La densidad del combustible se obtuvo a través de una distribución, y representa a las densidades de todas las refinerías del país donde se refina el diésel.

La Figura 4.14 muestra los resultados de la SMC el análisis de sensibilidad por el uso de diésel en las labores agrícolas. En la tabla 4.12 se describen las salidas del consumo de diésel en la etapa agrícola.

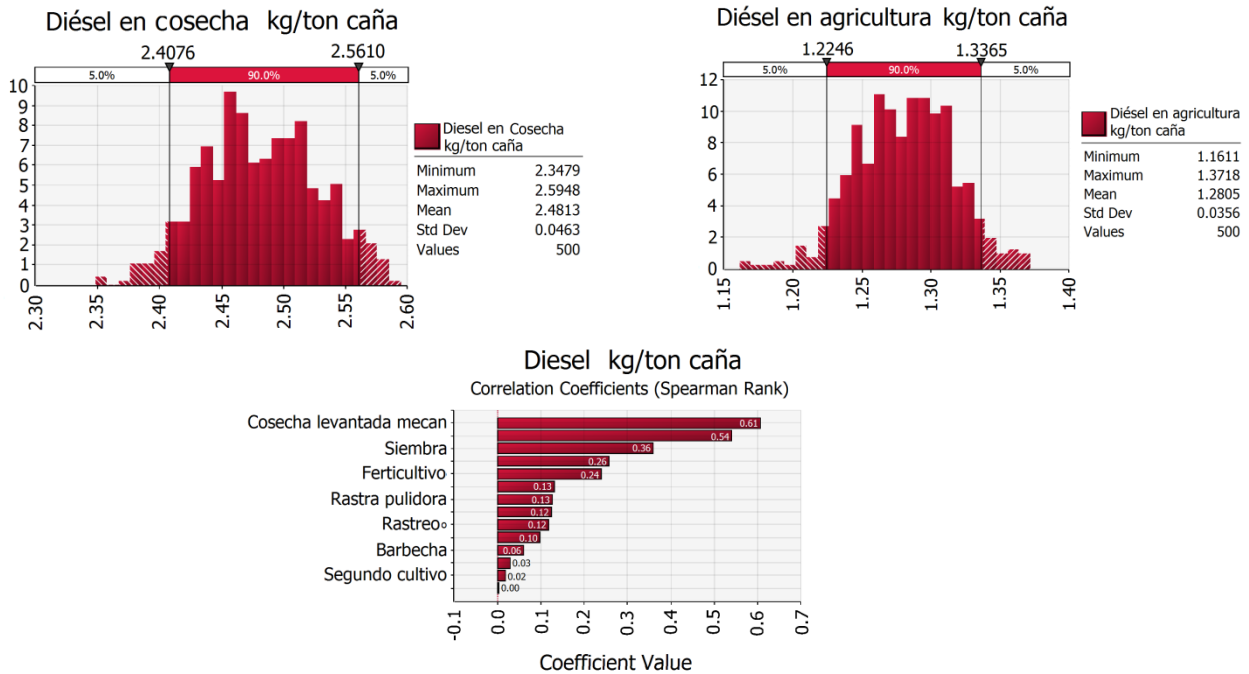


Figura 4.14 Resultados y gráfico de coeficientes de correlación por el uso de diésel.

Los gráficos de tornado del diésel utilizado en la cosecha muestran que los factores con mayor impacto son la cosecha levantada mecánicamente y la caña cosechada mecánicamente. Con respecto al diésel utilizado en labores agrícolas, el gráfico muestra que la siembra, el ferticultivo y el rastreo ocupan los tres primeros lugares. En el caso de la densidad del diésel aunque se encuentra en segundo lugar en ambos análisis es un factor no modificable, por lo tanto no puede hacer mucho para mejorar este aspecto.

4.4.3.2 Simulación Monte Carlo del transporte de caña

El uso de combustibles fósiles en el transporte de caña representa un impacto ambiental significativo, sin embargo, no solo el aspecto ambiental se ve involucrado, también juega un papel importante en los costos de producción del cultivo. Por esta razón, debe ser vigilada cualquier variación (ambiental y de costos) que se registre en esta etapa, de este modo se obtendrán los mejores rendimientos del producto.

Los datos proporcionados por el ingenio y los agricultores muestran que se utilizaron 639 vehículos de acarreo (entre camiones y carretas jaladas por tractores) para transportar la caña hacia el ingenio. La distancia en kilómetros promedio que recorren estos vehículos es de 35

km y los rendimientos del diésel indican que se consume 1 litro de diésel cada tres kilómetros recorridos y existe alteración cuando la carga del vehículo es variable (entre 6 y 14 toneladas). Los costos del diésel desde el año 2016 a la fecha han variado entre \$15 y \$21 pesos por litro. La demanda de caña por día de zafra se encuentra entre 7,000 y 7,500 toneladas de caña de azúcar, por lo tanto es indispensable para el ingenio tener una planeación adecuada y vigilar esta etapa en términos ambientales y de costos. En la Tabla 4.13 se describen los datos de entrada utilizados en este modelo, así también se puede observar la salida del modelo en la Tabla 4.14.

Tabla 4.13 Entradas en el modelo de SMC para el transporte de caña

Entradas	Distribuciones en el modelo	Unidad
Transporte de caña por camión		
Rendimiento en km Camión 14 ton	RiskTriang(2.1, 2.4,2.7)	km/l
Rendimiento en km Camión 13 ton	RiskTriang(2.2, 2.6,2.9)	km/l
Rendimiento en km Camión 12 ton	RiskTriang(2.5, 2.8,2.95)	km/l
Rendimiento en km Camión 11 ton	RiskTriang(2.4, 2.9,3.1)	km/l
Rendimiento en km Camión 10 ton	RiskTriang(2.6, 2.9,3.2)	km/l
Transporte de caña por carretas jaladas por tractor		
Rendimiento en km carretas 10 ton	RiskTriang(2.5,3.2,3.4)	km/l
Rendimiento en km carretas 9 ton	RiskTriang(2.7, 3.3,3.6)	km/l
Rendimiento en km carretas 8 ton	RiskTriang(2.8, 3.6,3.7)	km/l
Rendimiento en km carretas 7 ton	RiskUniform(2.6694,4.2306)	km/l
Rendimiento en km carretas 6 ton	RiskNormal(3.664,0.59376)	km/l
Distancia en kilómetros recorridos		
Camión y carreta jalada por tractores	RiskNormal(37.872,2.8232)	km
Combustible		
Densidad	RiskLogistic(0.8261973,0.0045052)	kg/l
Conversión MJ/kg	RiskLoglogistic(41.9029,1.1218,3.7086)	MJ/kg
Costo del diésel (MXN)		
Diésel (PEMEX)	RiskLogistic(15.7461,1.1349)	\$/l

Tabla 4.14 Salida en el modelo de SMC para el transporte de caña

Salidas	Unidad	Media	Desv. Est
Combustible			
Diésel	kg/ton caña	1.100	0.046

Abreviatura: Desv. Est = desviación estándar.

En las ecuaciones 4.36-4.41 se describen los modelos para calcular el consumo de diésel para un los camiones y para las carretas tiradas por tractor con capacidad de transportar i, j o n toneladas de caña. También se describe el consumo de total de diésel por ambos métodos de transporte y finalmente se estima el costo total por el consumo de diésel en el transporte de caña de azúcar.

$$CD_{CAM\ ijk} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) = \frac{\left(\frac{Distancia\ de\ reocrrido\ en\ kilometros}{Rendimiento\ del\ diesel\ en\ camión\ (l/km)} \right)}{Capacidad\ de\ carga\ del\ camion\ en\ ton} * Densidad \left(\frac{kg}{l} \right) \quad Ec\ 4.36$$

$$CD\ Camiones \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) = \frac{\Sigma CD_{CAM\ i(kg/ton\ caña)} + CD_{CAM\ j(kg/ton\ caña)} \dots + CD_{CAM\ n(kg/ton\ caña)}}{5} \quad Ec\ 4.37$$

$$CD_{CRR\ i} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) = \frac{\left(\frac{Distancia\ de\ reocrrido\ en\ kilometros}{Rendimiento\ del\ diesel\ en\ carretas\ (L/km)} \right)}{Capacidad\ de\ carga\ del\ carreta\ en\ ton} * Densidad \left(\frac{kg}{l} \right) \quad Ec\ 4.38$$

$$CD\ Carretas \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) = \frac{\Sigma CD_{CRR\ i(kg/ton\ caña)} + CD_{CRR\ j(kg/ton\ caña)} \dots + CD_{CRR\ n(kg/ton\ caña)}}{5} \quad Ec\ 4.39$$

$$CD_{Total} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) = \frac{CD\ Camiones \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) + CD\ Carretas \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right)}{2} \quad Ec\ 4.40$$

$$CostoTD = CD_{Total} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right) * Caña\ moida\ total\ (ton) * Costo\ unitario\ (l) \quad Ec\ 4.41$$

En donde $CD_{CAM\ ijk}$ = consumo de diésel del camión que tiene capacidad para transportar $i, j, o k$ toneladas de caña; $CD\ Camiones \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right)$ = consumo total de diésel de todos los camiones con diferentes capacidades de carga. $CD_{CRR\ i} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right)$ = consumo de diésel de la carreta que tiene capacidad para transportar $i, j, o n$ toneladas de caña; $CD\ Carretas \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right)$ = consumo total de diésel de todas las carretas con diferentes capacidades de carga. $CD_{Total} \left(\frac{kg}{ton\ caña} \right)$ = consumo total de diésel por los dos tipos de transporte de caña (camión y carreta). $CostoTD$ = costo total del diésel consumido por los dos tipos de transporte de caña. En la Figura 4.15 se muestran los resultados del modelo y el gráfico de coeficientes de correlación por el uso de diésel en el transporte de caña de azúcar hacia el ingenio azucarero.

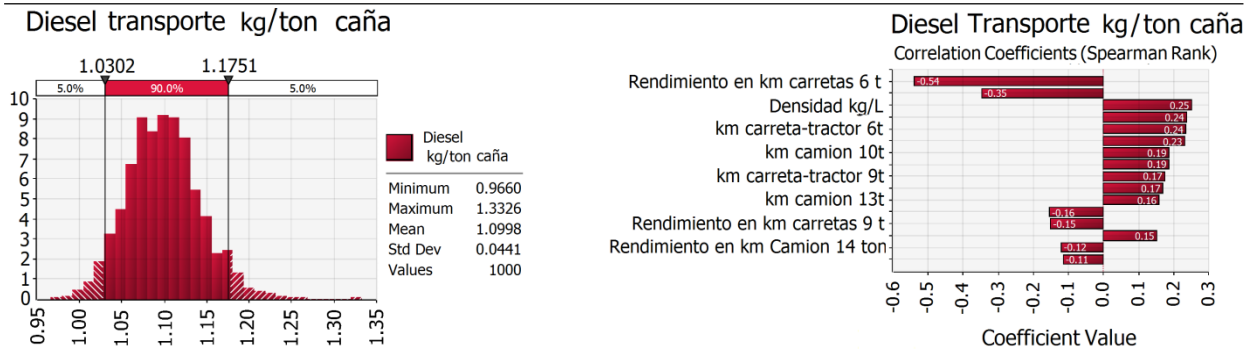


Figura 4.15 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por diésel en transporte.

El gráfico de tornado muestra que el rendimiento en km carretas de 6 ton tiene el mayor impacto, en segundo lugar se encuentra la densidad, más adelante se encuentran la distancia de recorrido en kilómetros, este último es un factor no modificable. Por lo tanto para realizar mejoras es necesario basarse en el rendimiento en carretas y camiones.

4.4.3.3 Simulación Monte Carlo de la fábrica y la cogeneración de electricidad

La obtención de azúcar estándar requiere de una gran cantidad de recursos para sembrar caña y producir azúcar con los estándares de calidad adecuados. En la fábrica, diferentes procesos suceden para elaborar el producto final que es la azúcar estándar (como se describe en el capítulo II). Sin embargo, la deficiencia tecnológica y en menor medida la deficiencia técnica han reducido la eficiencia en la fábrica, ocasionando problemas ambientales y costos elevados de las materias primas. En la Tabla 4.15 se observan los parámetros inciertos presentes en la fábrica, a partir de estos parámetros es posible obtener todos los flujos de salida del modelo general.

Tabla 4.15 Parámetros inciertos en la fábrica.

Entradas	Distribuciones	Unidad
Parámetros inciertos en campo y fábrica		
Hectáreas cosechadas	RiskLogistic(18736,974)	ha
Rendimiento de caña/ha	RiskLogistic(64.3149,5.9742)	ton/ha
Bagazo en caña	RiskUniform(24.853,26.869)/100	%
Consumo de combustóleo	RiskExpon(0.31667,RiskShift(7.67361))	l/ton caña
Caña no procesada	RiskExtvalue(46835.9,1633.3)	ton
Extracción de jugo mezclado	RiskLogistic(0.9787814,0.0018911)	%
Agua imbibición	RiskTriang(300100,302200,304000)	ton
Índice de generación de vapor	RiskExtvalue(2.070009,0.092088)	i
Porcentaje de vapor en molinos	RiskTriang(0.5,0.52,0.55)	%
Azúcar obtenido en fábrica	RiskBetaGeneral(0.37176,0.31831,0.0984137,0.1027839)	%
Melaza por ton de caña	RiskBetaGeneral(0.32449,0.43704,0.0301579,0.0340269)	%
Cachaza por ton de caña	RiskTriang(0.508,0.564,0.757)	%
kWh	RiskExtvalue(13.1909,0.94219)	kWh/ton caña
Precio de referencia del azúcar	RiskTriang(9750,9800,11000)	\$
Karbe neto teórico	RiskExtvalue(105.0052,2.454)	kg

En la Tabla 4.16 se observan los flujos de salida presentes en el Ingenio San Pedro. Es a partir de estos cálculos que es posible la modelación de las entradas de interés que son utilizadas para el análisis de ciclo de vida y para llegar a la optimización multiobjetivo en este trabajo de investigación.

Tabla 4.16 Parámetros totales de salida en la fábrica.

Salidas	Unidad	Media	Desv. Estándar
Caña molida bruta	ton	1,205,125.59	235,817.30
Bagazo total obtenido	ton	327,671.26	4,219.33
Consumo total de combustóleo	l	381,755.79	22,194.50
Jugo mezclado total	ton	1,179,510.46	4,127.54
Azúcar estándar total producida	ton	121,421.61	20,509.17
Cachaza total producida	ton	73,473.9	6,406.7
Melaza total producida	ton	38,329.4	1,738.1
Vapor total producido	ton	685,909.4	156,778.5
Energía total en fábrica	kWh	17,039,263.8	3,469,853.3
Precio de caña	\$/ton	617.71	25.24

A continuación, en la Tabla 4.17 se muestran las variables de entrada que suponen el consumo de aquellos recursos vitales para la producción de azúcar. En la Tabla 4.18 se observan las salidas o consumos actuales del Ingenio San Pedro.

Tabla 4.17 Entradas en el modelo de SMC para la fábrica y cogeneración.

Entradas	Distribuciones en el modelo	Unidad
Consumo de energía eléctrica de CFE		
Servicios en oficinas	RiskTriang(15268.98,15884.61,15884.61)	kWh CFE
Iluminación de fábrica	RiskTriang(37712.76,38240.42,42654.15)	kWh CFE
Sistemas de aire acondicionado	RiskTriang(25130.32,26298.08,27455.82)	kWh CFE
Fallas en el servicios en oficinas	RiskTriang(0,0.009,0.022)	%
Fallas en la Iluminación de fábrica	RiskTriang(0.02,0.03,0.037)	%
Fallas en sistemas de aire acondicionado	RiskTriang(0.01,0.02,0.027)	%
Consumo de cal		
Tipo de cosecha de caña		
Impurezas por cosecha mecánica	RiskTriang(0.01,0.02,0.025)	%
Impurezas por cosecha manualmente	RiskTriang(0.001,0.005,0.0095)	%
Impurezas por caña levantada manual	RiskTriang(0.001,0.009,0.02)	%
Calidad de la cal (Impurezas)	RiskTriang(0.001,0.002,0.003)	%
Filtración en tanque de lechada	RiskTriang(0.0012,0.0025,0.0041)	%
Ácido fosfórico en lechada	RiskTriang(0,0.0001,0.0002)	%
Consumo de bagazo		
Hectáreas cosechadas	RiskLogistic(18736,974)	ha
Rendimiento esperado de caña (ton/ha)	RiskLogistic(64.3149,5.9742)	ton/ha
Porcentaje de extracción de jugo mezclado	RiskLogistic(0.9787814,0.0018911)	%
Agua en imbibición	RiskTriang(300100,302200,304000)	ton
Pérdidas de bagazo	RiskExtvalue(5609.78,434.39)	ton
Consumo de combustóleo		
Combustóleo promedio por ton de caña	RiskExpon(0.31667,RiskShift(7.67361)	l
Caña no procesada	RiskExtvalue(46835.9,1633.3)	ton
Por gases de escape	RiskTriang(0.01,0.02,0.03,)	%
Combustión incompleta por causas químicas	RiskTriang(0.001,0.004,0.007,	%
Combustión incompleta por causas mecánicas	RiskTriang(0.049,0.07,0.0999,	%
Por el medio ambiente que rodea	RiskTriang(0.01,0.02,0.03	%
Problemas mecánicos en molienda	RiskTriang(0.001,0.0025,0.004)	%
Costos (MXN)		
Tarifa CFE para ingenios	RiskTriang(1.38,1.8,2.7)	\$/kWh
Cal	RiskTriang(6400,6500,6700)	\$/ton
Bagazo	0	\$/ton
Combustóleo	RiskLogistic(6.47735,0.50102)	\$/l

Abreviaturas en tabla: CFE = Comisión Federal de Electricidad; \$MXN = Tipo de cambio del peso mexicano.

Tabla 4.18 Salidas del modelo de SMC para la fábrica y cogeneración.

Salidas	Unidad	Media	Desv. Est.
Energía eléctrica de CFE	kWh/ton azúcar est	0.7039	0.0015
Uso de cal	kg/ton azúcar est	7.1444	0.0532
Uso de bagazo	ton/ton azúcar est	2.65	0.04
Uso de combustóleo	MJ/ton azúcar est	121.66	1.46

Abreviaturas en tabla: CFE = Comisión Federal de Electricidad

La energía eléctrica en los ingenios azucareros es utilizada en temporada de zafra y en temporada de reparación (no zafra). Durante la época de zafra este ingenio genera su propia energía a partir de la combustión del bagazo, y no se compra energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad (CFE); por esta razón, el impacto ambiental en esta temporada no se considera significativo. Sin embargo, en temporada de reparación si se consume energía eléctrica de CFE, esta energía se utiliza en servicios de oficinas, iluminación de la fábrica y reparación, y en los sistemas de aire acondicionado. El consumo es relativamente bajo pero es importante revisar cuál es su desempeño ambiental y su costo en temporada de reparaciones. En las ecuaciones 4.42-4.45 se describen los modelos matemáticos de este consumo.

$$\text{Energía en fábrica}_{kWh} = \text{SalidaInc} (\sum CSO + CRIF + CSAA) \quad \text{Ec 4.42}$$

$$\text{Fallas en energía}_{kWh} = \sum (\%FSO * CSO) + (\%FRIF * CRIF) + (\%FSAA * CSAA) \quad \text{Ec 4.43}$$

$$\text{Consumo} \left(\frac{kWh}{\text{ton azúcar}} \right) = \frac{\text{Energía en fábrica}_{kWh} + \text{Fallas en energía}_{kWh}}{\text{Azúcar producida total}} \quad \text{Ec 4.44}$$

$$\text{Costo total energía} = \text{Consumo} \left(\frac{kWh}{\text{ton azúcar}} \right) * \text{Azúcar Est Prod Total} * \text{Tarifa CFE}_{(kWh)} \quad \text{Ec 4.45}$$

donde *SalidaInc* = salida simulada con incertidumbre de la sumatoria; *CSO* = consumo de energía en sistemas de oficina; *CRIF* = consumo de energía en reparaciones e iluminación en fábrica; *CSAA* = consumo de energía en sistemas de aire acondicionado; *%FSO* = Porcentaje de fallas en sistemas de oficina; *%FRIF* = porcentaje de fallas en reparaciones e iluminación en fábrica; *%FSAA* = porcentaje de fallas en sistemas de aire acondicionado; *Azúcar Est Prod Total* = Azúcar estándar total producida en el ingenio. La Figura 4.16 muestra los resultados del modelo y grafico de tornado del diésel en el transporte de caña.

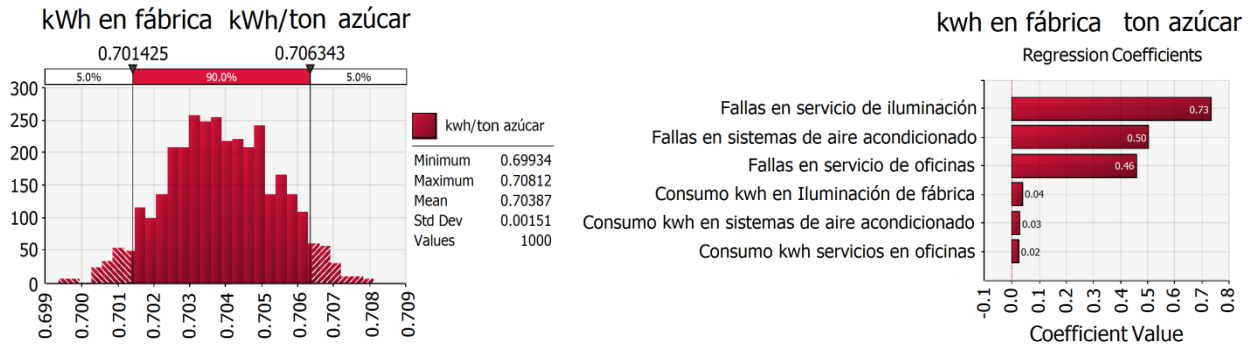


Figura 4.16 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso de diésel en el transporte.

Con respecto al análisis del gráfico de tornado se puede observar que las fallas en servicio de iluminación y reparación son los factores que mayor impacto tienen en el estudio, en segundo lugar las fallas en sistemas de aire acondicionado. Aunque el impacto ambiental no es significativo, y los costos son relativamente bajos es importante vigilar esta etapa para que no ocasione problemas en el mediano y largo plazo.

La cal se utiliza en el ingenio azucarero, específicamente en la clarificación del jugo (purificación y el alcalinizado). En el alcalinizado, el guarapo (Jugo que escurre de la caña molida) tiene un pH promedio de 5 a 5.7 y se alcaliniza hasta un promedio de 7.5. En este ingenio se tienen 2 tipos de alcalinizados: a) alcalizado en frío que sirve para el tratamiento de jugos de caña fresca y con pocas impurezas; b) alcalizado en caliente que se refiere al tratamiento de los jugos que son difíciles de tratar, o jugos de cañas rezagadas y con un alto contenido de impurezas (tierra, arcilla, arena, etc.). En general, el uso de cal tiene dos funciones, primero incrementar el pH y después aglomerar y flocular las impurezas contenidas en el jugo de caña. En las ecuaciones 4.46-4.50 se describen los modelos de este consumo.

$$CEcal_{kg} = Kg \text{ cal por ton caña} * \text{Caña bruta total} \quad \text{Ec 4.46}$$

$$IncCal_{kg} = \sum (TCC * CEcal_{kg}) + (CAC * CEcal_{kg}) + (FTL * CEcal_{kg}) + (AFL * CEcal_{kg}) \quad \text{Ec 4.47}$$

$$CT cal_{kg} = CEcal_{kg} - IncCal_{kg} \quad \text{Ec 4.48}$$

$$\text{Consumo de cal} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton azúcar}} \right) = \frac{CT \text{ cal}_{kg}}{\text{Azúcar Est Prod Total}} \quad \text{Ec 4.49}$$

$$\text{Costo total de cal} = \frac{\text{Consumo de cal} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton azúcar}} \right) * \text{Azúcar Est Prod Total}}{1000} * \text{Costo de cal por ton azúcar} \quad \text{Ec 4.50}$$

donde $CE_{cal_{kg}}$ = consumo esperado de cal en kg; $IncCal_{kg}$ = incremento del consumo de cal en kg; $CT_{cal_{kg}}$ = consumo total de cal; TCC = contribución porcentual por el tipo de cosecha de la caña (mecánica, semi-mecánica, manual); CAC = contribución porcentual por la calidad de la cal; FTL = contribución porcentual por la filtración en tanque de lechada; AFL = contribución porcentual por el uso de ácido fosfórico en la lechada; $Azúcar \text{ Est Prod Total}$ = Azúcar estándar total producida en el ingenio. En la Figura 4.17 se observa el resultado del modelo y el análisis de sensibilidad por uso de cal.

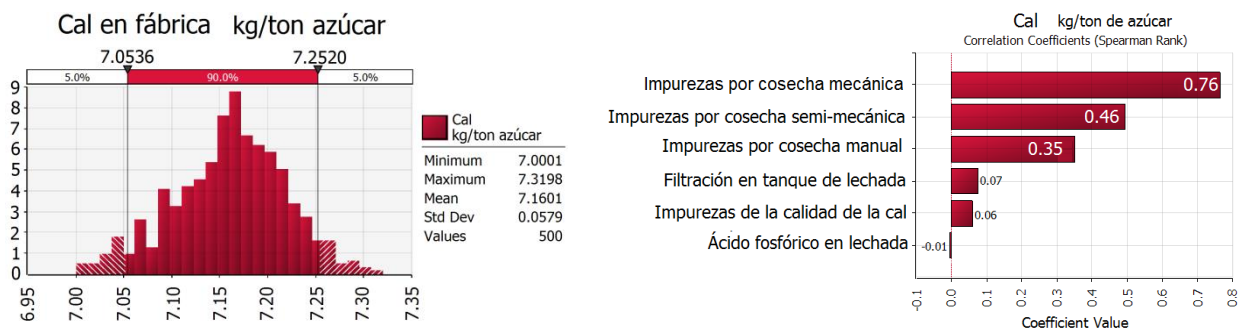


Figura 4.17 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso cal en fábrica.

El gráfico de tornado indica que los factores que mayor impacto tienen en la salida son las impurezas por levantada manual, por cosecha mecánica y por cosecha manual, durante en análisis de ciclo de vida los resultados muestran que el uso de cal no tiene un impacto significativo para el estudio.

La planta de energía eléctrica genera electricidad a partir de la combustión del bagazo, esta energía sirve para mover todo el equipo y la maquinaria necesaria para el proceso de producción de azúcar. La cogeneración se realiza únicamente durante el periodo de zafra, pues en el periodo de reparación se utiliza electricidad de CFE como se explicó anteriormente. Para producir electricidad se requiere de generadores de vapor; el vapor se produce a través de adición de calor que es generado por la combustión de bagazo y cuando no se alcanza la cuota

es necesario recurrir a la combustión del petróleo. Los modelos de esta etapa se describen en las ecuaciones 4.51-4.54.

$$CañaMB_{ton} = Hectareas cosechadas * Rendimiento esperado \left(\frac{ton}{ha}\right) \quad Ec 4.51$$

$$Jugom_{ton} = PEJMC * CañaMB_{ton} \quad Ec 4.52$$

$$BagazoT_{ton} = (CañaMB_{ton} + AguaImb_{ton}) - Jugom_{ton} - Pérdidas de bagazo_{ton} \quad Ec 4.53$$

$$Bagazo \left(\frac{ton}{ton\ azúcar}\right) = \frac{BagazoT_{ton}}{Azúcar\ Est\ Prod\ Total} \quad Ec 4.54$$

donde $CañaMB_{ton}$ = caña molida bruta obtenida en toneladas; $PEJMC$ = porcentaje de extracción de jugo mezclado en caña; $Jugom_{ton}$ = jugo mezclado obtenido en toneladas; $BagazoT_{ton}$ = bagazo total obtenido en toneladas; $AguaImb_{ton}$ = agua obtenida en imbibición en toneladas; $Azúcar\ Est\ Prod\ Total$ = Azúcar estándar total producida en el ingenio. El costo total del bagazo como materia prima es absorbido en el costo de producción de azúcar. Este costo generado es incluido cuando se realiza el pago de la caña de azúcar. Es por lo anterior que la cogeneración de energía a partir del bagazo se vuelve un subproducto rentable (siempre y cuando el costo del kilowatt –hora sea mayor a los 10 centavos de dólar) (J. O. R. Contreras, 2015). En la Figura 4.18 se observa los resultados y el análisis de sensibilidad por uso del bagazo en la cogeneración de energía eléctrica.

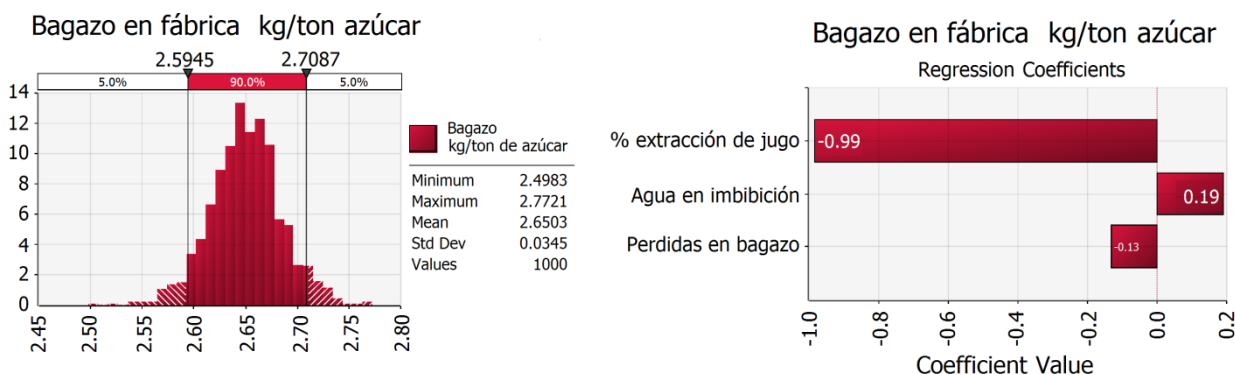


Figura 4.18 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso bagazo.

El gráfico de tornado indica que el porcentaje de extracción de jugo mezclado es la variable que mayor impacto (negativo) tiene en el consumo de bagazo, seguido del agua en imbibición y por último las pérdidas de bagazo. Como se explica anteriormente, si la demanda de bagazo

no cubre las necesidades de la fábrica entonces se recurre al uso de combustibles fósiles. En la mayoría de ingenios del país se insiste en reducir el consumo de este tipo de combustibles debido a que su combustión produce emisiones de GEI. En este caso, no se puede eliminar su uso por completo, por lo tanto se utiliza combustóleo para terminar de cubrir la cuota necesaria en el ingenio. Las ecuaciones 4.55 – 4.58 describen los modelos del consumo y costo del combustóleo.

$$CombTotal_{litros} = CombPromedio\left(\frac{l}{ton\ caña}\right) * Caña\ no\ procesada_{ton} \quad Ec\ 4.55$$

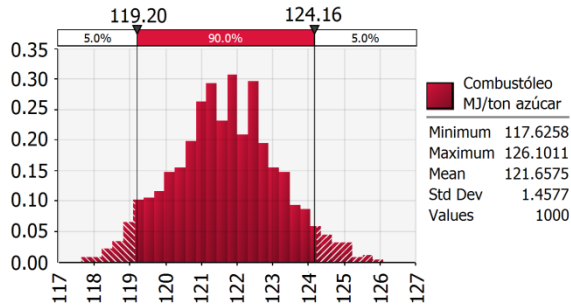
$$IncComb_{litros} = PGEsc + PCICQ \dots + PPMM * Combustoleo\ total_{litros} \quad Ec\ 4.56$$

$$Combustóleo\left(\frac{MJ}{ton\ azúcar}\right) = \frac{CombTotal_{litros} * PN\left(\frac{MJ}{L}\right)}{Azúcar\ Est\ Prod\ Total} \quad Ec\ 4.57$$

$$CostoTComb = CombTotal_{litros} * Costo\ por\ litro\ (PEMEX) \quad Ec\ 4.58$$

donde $CombTotal_{litros}$ = combustóleo total utilizado en las calderas; $CombPromedio\left(\frac{l}{ton\ caña}\right)$ = consumo de combustóleo promedio estimado en litros por tonelada de caña; $IncComb_{litros}$ = Incremento del uso del combustóleo; $PGEsc$ = Porcentaje de contribución en el aumento de diésel por gases de escape; $PCICQ$ = Porcentaje de contribución en el aumento de diésel por combustión incompleta por causas químicas; también se deben agregar factores como combustión incompleta por causas mecánicas y por el medio ambiente que rodea, estos factores afectan la eficiencia en las calderas. PMM = Porcentaje de contribución en el aumento de diésel por problemas mecánicos en molienda, estos problemas afectan la eficiencia en la molienda; $PN\left(\frac{MJ}{L}\right)$ = indicador de conversión de litros a Megajouls; $CostoTComb$ = costo total del combustóleo utilizado en el ingenio; $Azúcar\ Est\ Prod\ Total$ = Azúcar estándar total producida en el ingenio. La Figura 4.19 muestra los resultados y el análisis de sensibilidad por el uso de combustóleo en la fábrica.

Combustóleo en fábrica MJ/ton azúcar



Combustóleo en fábrica Correlation Coefficients (Spearman Rank)

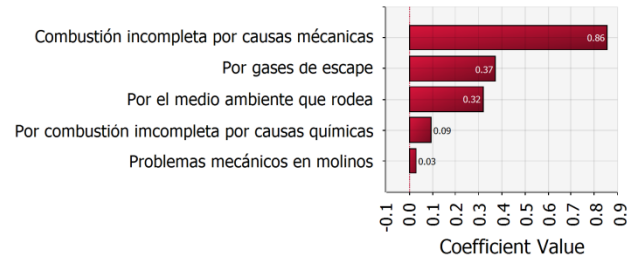


Figura 4.19 Resultado y gráfico de coeficientes de correlación por uso combustóleo.

El gráfico de tornado indica que el porcentaje de contribución en el aumento de diésel por la combustión incompleta por causas mecánicas es el factor que mayor impacto tiene en el estudio, seguido porcentaje del medio ambiente que rodea las calderas y el porcentaje por los gases de escape.

Los resultados de la SMC incluyen incertidumbre, sin embargo, para realizar la optimización multiobjetivo los resultados tienen que ser valores puntuales. Por lo tanto los resultados son convertidos a valores puntuales (ver resultados en Tabla 4.12 para agricultura, Tabla 4.14 para transporte de caña, y Tabla 4.18 para fábrica y cogeneración). A partir del siguiente punto, los resultados obtenidos en las tablas mencionadas anteriormente se convierten en el parámetro $ES_{j,k}$ = Entrada simulada del componente j en la categoría k . La descripción del parámetro $ES_{j,k}$ se explica en los siguientes párrafos.

4.4.3.4 Formulación del problema de optimización

Esta etapa consiste en llevar a cabo la optimización multiobjetivo. Para llegar a este punto se realizó la SMC en donde se identificaron a aquellas variables que tienen un impacto significativo en el modelo, una vez identificadas y por orden de prioridad fueron evaluadas para realizar cambios en ellas y de esta manera se puedan minimizar los impactos ambientales y el costo total. La formulación de esta etapa se llevó a cabo con los cuatro impactos finales del estudio de ACV, además se incluyeron los costos de las materias primas y energía utilizados en los procesos. El cálculo de los costos totales se representa con la ecuación 4.59.

$$\text{Costo totales} = \sum \text{Costos agricultura} + \text{Costos transporte} + \text{Costos fábrica} \quad \text{Ec 4.59}$$

La formulación del problema de optimización incluye las cuatro categorías punto final, los resultados de estas categorías de daño se estiman como se muestra a continuación. En la ecuación 4.60 se estima el Factor de impacto del componente j en la categoría k (*Factor de impacto_{j,k}*). Como ejemplo, en la etapa agrícola los componentes j representan a las emisiones de los fertilizantes, pesticidas, herbicidas, y el uso de diésel; y las categorías k representan las categorías punto medio (Carcinógenos, no carcinógenos, inorgánicos respirados, ecotoxicidad terrestre, etc). Las emisiones totales del componente j en la categoría k son proporcionadas por el software SimaPro; y la $ES_{j,k}$ (Entrada simulada del componente j en la categoría k) representa el dato de entrada modelado con SMC y después convertido a un parámetro determinístico para llevar a cabo la optimización multiobjetivo.

$$\text{Factor de impacto}_{j,k} = \frac{\text{Emisiones totales del componente } j \text{ en la categoría } k}{ES_{j,k}} \quad \text{Ec 4.60}$$

donde:

$\text{Factor de impacto}_{j,k}$ = Factor de impacto del componente j en la categoría k

$ES_{j,k}$ = Entrada simulada del componente j en la categoría k

En la ecuación 4.61, se describe el modelo para calcular la caracterización manual del componente j en la categoría k (*Caracterización manual_{j,k}*). El parámetro de las toneladas de caña para producir una tonelada de azúcar es igual a 9.73 toneladas.

$$\text{Caracterización manual}_{j,k} = \frac{\text{Factor de impacto}_{j,k} * ES_{j,k}}{\text{Toneladas de caña para producir una ton azúcar}} \quad \text{Ec 4.61}$$

El modelo de la puntuación de daño se describe en la ecuación 4.62, donde los factores de daño en la categoría k (DF_k) son parámetros establecidos por la metodología IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).

$$\text{Puntuación de daño}_{j,k} = (DF_k)(\text{Caracterización manual}_{j,k}) \quad \text{Ec 4.62}$$

donde:

$\text{Puntuación de daño}_{j,k}$ = Puntuación del componente j en la categoría k

DF_k = Factor de daño en la categoría k

La puntuación del daño en la normalización del componente j en la categoría k se representa por la ecuación 4.63; los factores de normalización en la categoría k (NF_k) se encuentran establecidos en la metodología IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).

$$\text{Puntuación de daño en la normalización}_{j,k} = \frac{\text{Puntuación de daño}_{j,k}}{NF_k} \quad \text{Ec 4.63}$$

donde:

NF_k = Factor de normalización en la categoría k

La puntuación de daño es el último modelo que se calcula, a partir de este, los resultados de las categorías de impacto punto final se representan como salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos. A partir de estos resultados, las categorías de impacto punto final se convierten en las funciones objetivo, quedando de la siguiente manera:

Las funciones objetivo del problema de optimización se indican a continuación:

Minimizar (Salud humana)

Minimizar (Calidad del ecosistema)

Minimizar (Cambio climático)

Minimizar (Recursos)

Minimizar (Costos totales)

La optimización se realizó con MultiGen, donde el algoritmo NSGA II fue utilizado, los parámetros del algoritmo genético fueron las siguientes: Población de 300, Generaciones de 100, Tasa de cruzamiento 0.8, Tasa de mutación 0.5 y precisión del algoritmo de 1E-14.

Los factores con mayor impacto en el estudio se obtuvieron a partir del análisis de incertidumbre realizado con SMC; estos factores son importantes porque que a partir de ellos se pueden realizar cambios en el modelo y así minimizar los impactos ambientales y los costos

de las materias primas y energía. En la Tabla 4.19 se describen los factores que mayor impacto tuvieron en el modelo de SMC.

Tabla 4.19 Factores con mayor impacto en el estudio

Factor	
Producción esperada (ton)	Mezclas y procedimientos de aplicación
Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	Caña levantada mecánicamente con alzadora
Calibración adecuada (mochila, pulverizador, etc)	Caña cosechada mecánicamente
Costo del pesticida (\$)	Rendimiento promedio km/l
Mantenimiento (de equipos mecánicos)	

En la Tabla 4.20 se describen las variables de decisión utilizadas en el modelo matemático, así también la restricción de variación de cada variable y su unidad de medida.

Tabla 4.20 Variables de decisión

Variables	Restricción de variación		Unidad	Observación
	Min	Max		
Rendimiento pronosticado en campo	71	78	ton	
Porcentaje de materia extraña en campo	12	15	%	
Materia orgánica	0	12	%	
pH	4	6.8	pH	
Conductividad eléctrica	0	5.5	(dS m-1)	
Índice de anegamiento	0	6	i	
Evaluación de la calibración de los equipos	0	10	Puntaje	
Porcentaje de tecnificación del campo	0	100	%	
Tipos de Mtto	1	4	4 tipos	Preventivo, predictivo, etc
Mezclas de tratamientos	1	3	Mezclas	Ametrina+diuron, o ametrina+2.4D,etc
Procedimientos de aplicación	1	3	Tipos	Calibración en pulverizador
Longitud del terreno	0	1000	m	
Pendientes	0	55	%	
Habilidad del operador	1	3	Evaluación	
Capacidad de giro de alzadora	0	360	Grados	
Estado mecánico de las Máquinas	1	2	Evaluación	
Diseño del campo	0	100	%	
Experiencia del cosechador	1	3	Evaluación	Poca, regular, y buena experiencia
Velocidad	1	2	Evaluación	Constante o variable
Antigüedad del vehículo	1	2	Evaluación	Menor o mayor a 10 años
Tipo de carretera	1	2	Evaluación	Autopista o federal
Surcado	0	1.6	m	
Distancia entre hileras	0	60	cm	
Altura de lomos	0	15	cm	
Ancho entre cepas	0	55	cm	

Las siguientes restricciones relacionadas a los objetivos del estudio también son consideradas en el modelo.

1. El costo total de la materia prima y la energía debe ser menor o igual a \$ 199,000,000.0 MXN.
2. La categoría punto final salud humana debe ser menor o igual a 0.3 DALY.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se describieron las metodologías que se utilizan para resolver la problemática actual. Primero se describe la aplicación del ACV en la cadena de suministro del azúcar de caña, partiendo de la revisión del estado del arte, el objetivo y alcance, el inventario y las herramientas que se utilizaron para la EICV, como la metodología de evaluación IMPACT 2002+ y el software SimaPro. En segundo lugar, se explica cómo se desarrolla el SEAD en fertilización NPK, la elección de variables y la arquitectura del modelo (funciones de membresía, modelos matemáticos y reglas difusas), hasta llegar a etapa de pruebas donde se observa la recolección de datos utilizados para este paso. Por último, se describen los pasos de la metodología para realizar la OMAG, iniciando con el modelo de SMC y su integración de los resultados al ICV, a partir de esta fase el análisis de sensibilidad ayuda a identificar las variables de decisión que optimizaran el modelo matemático con consideraciones ambientales y de costos.

Capítulo V

Resultados

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo mostrar los resultados de la evaluación de impacto ambiental, así como los resultados de los modelos planteados para la estimación de tasas de fertilizantes y los de la optimización multiobjetivo. También se discuten las áreas de oportunidad en las cuales los modelos pueden ser mejorados. Los resultados de este trabajo de investigación deben convencer y demostrar a los interesados que estos modelos cumplen sus expectativas, y así poder utilizarlos en la práctica habitual como herramientas de mejora para las prácticas agrícolas y de ingeniería.

5.1 Resultados del ACV en la producción de azúcar de caña

Las etapas de análisis del ICV y el EICV se llevaron a cabo utilizando el software SimaPro 8.3.0. Los resultados son descritos por UF para las trece categorías de impacto de punto medio y luego para las cuatro categorías de punto final siguiendo la metodología IMPACT 2002+.

5.1.1 Análisis de la contribución de las etapas

La contribución ambiental de las cuatro etapas se muestra en la Figura 5.1 El cultivo y la cosecha de caña de azúcar registraron el impacto más grave en el sistema analizado (52%); en esta etapa, los factores que más contribuyen son la fabricación de fertilizantes, la fertilización de los campos agrícolas, el uso de herbicidas, el uso de diésel como combustible de maquinaria para la preparación de suelo y la cosecha de caña. La cogeneración de electricidad a partir de la quema de bagazo representa el segundo lugar en cuanto a impactos ambientales (25.7%), explicado principalmente por la combustión de esta biomasa en la fábrica. El transporte de caña de azúcar es el tercero en impacto relativo (12.1%); la producción y el transporte de diésel, así como el transporte de caña de azúcar al ingenio representan los principales contribuyentes en esta etapa. Finalmente, la etapa de molienda de azúcar representa el impacto menos agresivo (10.2%); los factores que contribuyen a esta etapa son el uso de combustóleo, el uso de la cal y el uso de la electricidad adquirida a CFE.

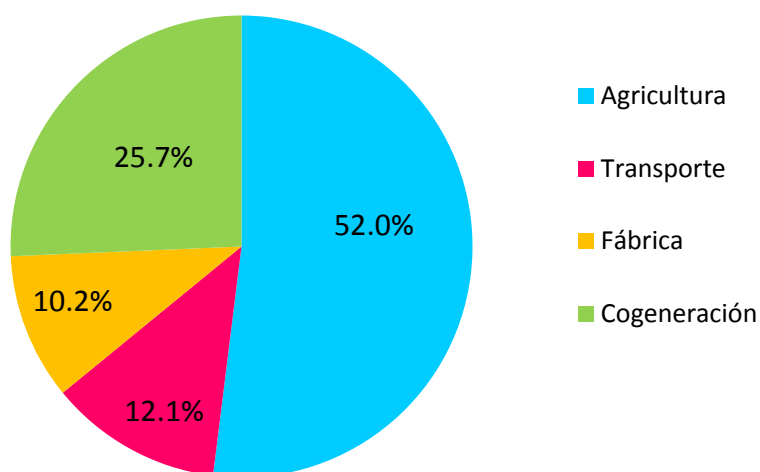


Figura 5.1 Contribución ambiental de las etapas.

5.1.2 Análisis de emisiones ambientales.

La emisión total de la categoría de *calentamiento global* es 1,156.1 kg CO₂ eq. La industria azucarera contribuyó con el 50.6%, seguida por la agricultura de la caña de azúcar 39.5%, el transporte de la caña de azúcar el 9.2% y la cogeneración de electricidad el 0.7%. La categoría de impacto de *energía no renovable* reportó emisiones totales de 8,572.9 MJ de energía primaria; el cultivo y la cosecha de la caña de azúcar tiene la contribución más significativa, con un 60.3%, seguido por la molienda del azúcar del 20.6%, el transporte de la caña de azúcar el 18.8% y la cogeneración de electricidad con la contribución menos significativa del 6.1%. La categoría de *extracción de minerales* reportó 17.2 MJ de energía excedente/kg extraídos; la contribución más significativa se encuentra en la etapa de agricultura con 69.8%. Las contribuciones de las etapas de molienda de caña, transporte de caña de azúcar y cogeneración de electricidad fueron de 16.5%, 7.5% y 6.1% respectivamente. Los resultados de la Tabla 5.1 representan el porcentaje unitario de cada categoría de impacto estimada para cada etapa. Además, se pueden observar las sustancias emitidas por cada categoría de impacto, con una UF de una tonelada de azúcar estándar.

Tabla 5.1 Contribuciones relativas totales de las cuatro etapas.

Categoría de impacto	Agricultura	Transporte de caña	Ingenio azucarero	Cogeneración de electricidad	Emisiones totales por UF
Carcinógenos	50.6%	5.4%	26.6%	17.4%	16.1 kg C ₂ H ₃ Cl eq
No-carcinógenos	22.2%	0.4%	1.7%	75.7%	51.2 kg C ₂ H ₃ Cl eq
Inorgánicos respirados	39.9%	18.2%	3.6%	38.3%	2.8 kg PM _{2.5} eq
Radiación ionizante	59.3%	12.1%	28.2%	0.4%	4,842.5 Bq C-14 eq
Depresión de la capa de ozono	86.1%	6.3%	7.5%	0.1%	0.00011 kg CFC-11 eq
Orgánicos respirados	55.8%	30.2%	8.4%	5.6%	0.4 kg C ₂ H ₄ eq
Ecotoxicidad acuática	8.1%	0.4%	2.0%	89.6%	348,026.7 kg TEG water
Ecotoxicidad terrestre	15.2%	0.2%	1.3%	83.2%	135,987.1 kg TEG soil
Acidificación/nitrificación terrestre	85.1%	5.3%	1.8%	7.7%	104 kg SO ₂ eq
Ocupación de tierra	83.7%	2.0%	5.7%	8.6%	6.5 m ² org.arable
Calentamiento global	39.5%	50.6%	9.2%	0.7%	1,156.1 kg CO ₂ eq
Energía no-renovable	60.3%	18.8%	20.6%	0.4%	8,572.9 MJ primary
Extracción mineral	69.8%	7.5%	16.5%	6.1%	17.2 MJ surplus

La contribución a las categorías punto final mostró los siguientes resultados. La categoría punto final con el impacto más significativo fue la Salud Humana (53.4%); donde, los impactos se explican principalmente por las actividades de agricultura, después por la cogeneración de electricidad y el transporte de la caña de azúcar. La categoría punto final que ocupa el segundo lugar es el Cambio Climático (20.8%); en donde, el transporte de caña de azúcar representa la contribución más significativa seguida por la agricultura de caña y el ingenio azucarero. En el tercer puesto, se encuentra la Calidad del Ecosistema (15.8%); los impactos se deben a la cogeneración de electricidad. Finalmente, la categoría de Recursos (10.1%) se explica primero por el transporte de caña de azúcar, luego por la agricultura de caña y con un impacto menos significativo en la molienda de azúcar. La etapa de cogeneración de electricidad no representó impactos significativos en ninguna de las cuatro categorías punto final. Lo descrito anteriormente se observa en la Figuras 5.2 y 5.3.

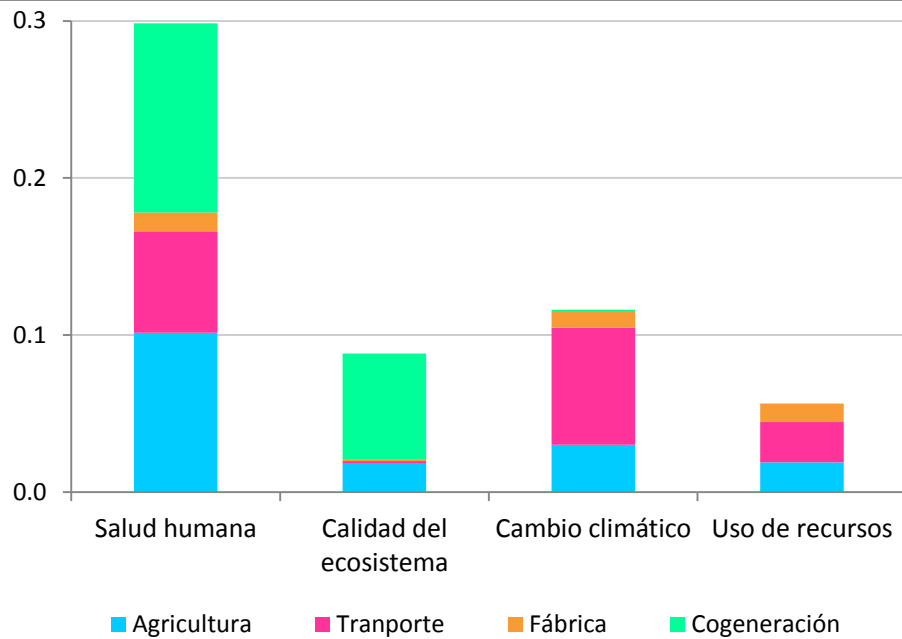


Figura 5.2 Contribución de los impactos de las etapas de análisis.

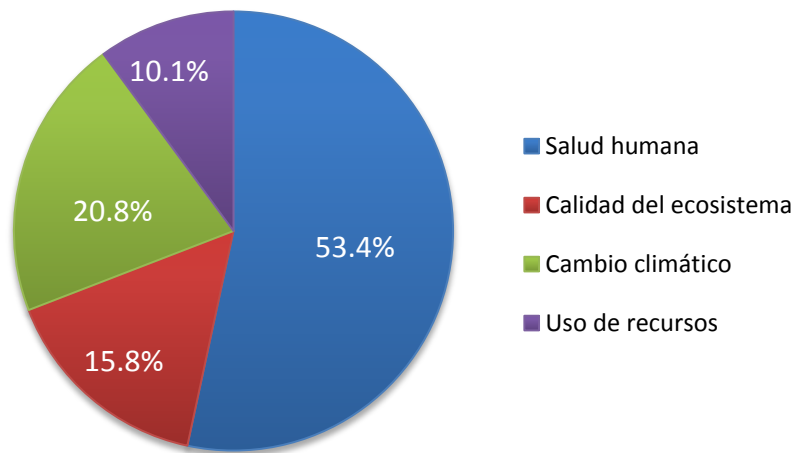


Figura 5.3 Porcentaje de contribución ambiental de las categorías punto final.

A continuación en la Figura 5.4 se desglosan todos los porcentajes de contribución de las categorías Salud Humana, Calidad del ecosistema, Cambio climático y uso de Recursos. Los porcentajes en la categoría de la Salud humana indican que la cogeneración (40%) y la agricultura (34%) son las etapas que mayor contribución tienen a esta categoría punto final. En la categoría Calidad del ecosistema se observa que la cogeneración (76%) y la agricultura

(21%) también representan el mayor impacto. En el uso de recursos la agricultura (33%) y el transporte (46%) aportan el mayor impacto. Finalmente, en la categoría Cambio climático el transporte (64%) y la agricultura (64%) tienen el impacto más significativo; en todas las categorías punto final, la agricultura de caña es la etapa con mayor impacto.

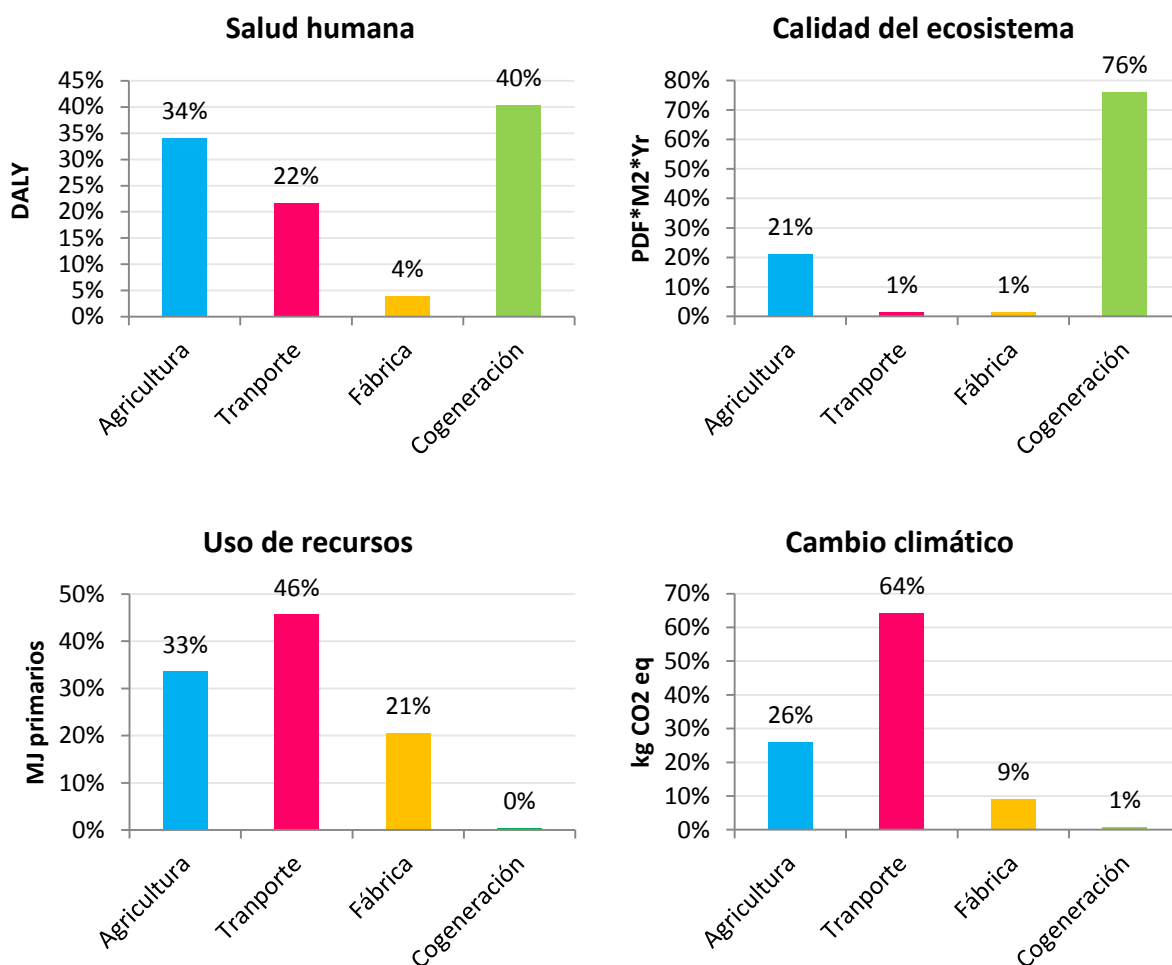


Figura 5.4 Porcentaje de contribución en las 4 categorías punto final.

5.1.3 Discusión y recomendaciones de los resultados obtenidos

Actualmente, los problemas ambientales requieren un análisis particular y cuidadoso mediante el uso de herramientas que son eficientes y explican en detalle los impactos ambientales generados por un sistema de producto. Actualmente en México, la industria de azúcar de caña no tiene bases de datos ambientales o estudios de ACV aplicados a la cadena de suministro de este producto, incluso sabiendo que existe un enorme daño ambiental causado por esta

industria. Este estudio es el primer ACV desarrollado en el estado de Veracruz, México; la región donde se encuentra el mayor número de fábricas de azúcar en todo el país. Este trabajo incluyó cuatro etapas de la cadena de suministro de la caña de azúcar: Agricultura de caña de azúcar, Transporte de caña, Fábrica y Cogeneración de electricidad.

Los trabajos científicos discutidos en el estado del arte muestran datos similares a los datos utilizados en este estudio, especialmente en la etapa ICV. Sin embargo, las variaciones más significativas de las emisiones se explican por las diferentes condiciones que prevalecen en las regiones productoras de caña de azúcar, por ejemplo, las características del suelo, la temperatura o la precipitación. Por ejemplo, Ramjeawon, (2004) estimó que el cultivo, la cosecha y la fabricación de fertilizantes en conjunto contribuyen con el 66%, la producción de azúcar y la cogeneración eléctrica contribuyen con el 20% y el transporte de caña de azúcar el 13% de los impactos generales del sistema producto. Lestari et al., (2013) estimaron que la agricultura de caña de azúcar contribuye con el 86%, la etapa industrial con 8.4% y el transporte de caña con el 5.6% de los impactos totales. No se incluyó la quema de la caña de azúcar verde antes de la cosecha. En comparación con trabajos científicos anteriores, los resultados muestran que el 52% de los impactos son causados por la agricultura de caña de azúcar (este indicador es menor al 66% y el 86% de los trabajos científicos anteriores), el 25.7% por cogeneración de electricidad (superior a Ramjeawon), el 12.1% para el transporte de caña de azúcar (menor que Ramjeawon, pero mayor al de Lestari) y 10.2% para la molienda de azúcar (mayor que Lestari). En los estudios de Ramjeawon y Lestari, los indicadores resultan altos para la etapa agrícola; sin embargo, este estudio muestra que algunos aspectos de la etapa de la Agricultura de caña de azúcar generan menos impacto. No se incluyó la quema de caña verde antes de la cosecha.

El calentamiento global (categoría punto final del cambio climático) en la etapa de Agricultura contribuye con 39.5%. Este indicador es inferior al 80% estimado por Ramjeawon, (2004) y también inferior al 74% determinado por Mashoko et al., (2010). En este caso particular, las etapas con la contribución más significativa al Calentamiento global fueron el Transporte de caña de azúcar con 50.6% y la Agricultura de caña de azúcar, que en conjunto contribuyen con el 90.1% del total de emisiones de CO₂ equivalentes del ACV. En este estudio, es menor el

impacto en la Agricultura porque hay un uso moderado de pesticidas y herbicidas; existe un bajo consumo de combustibles fósiles para el trabajo de preparación del suelo y no ocupa grandes áreas de tierra. Transportar la caña de azúcar al ingenio representa una gran carga de emisiones. Las razones principales son la edad de los camiones (entre 10 y 30 años) y la distancia considerable que deben recorrer (más de 35 km en promedio). En consecuencia, el consumo de combustible por tonelada de caña de azúcar es muy alto.

El consumo total de energía no renovable (categoría de punto final de los recursos) fue de 8,572.9 MJ de energía primaria, siendo la etapa de la Agricultura de caña la que más consume con un 60.3%. El uso de urea, fosfato diamónico y el consumo de diésel usado en la cosecha de caña de azúcar contribuyen a este indicador elevado. La molienda azucarera contribuyó con 20.6%; este alto indicador es una consecuencia de la producción y uso de diésel. Estas dos categorías representan el 80.9% de los impactos ambientales globales. El indicador de energía no renovable de este estudio es mayor en comparación con Mashoko et al., (2010) quien estimó un consumo de 5,350.0 MJ de energía primaria y también es mayor a la estimación de Ramjeawon, (2004) que estimó un consumo de 1,995.0 MJ de energía primaria.

Algunos trabajos científicos, solo analizan la etapa agrícola; por ejemplo, M.A Renouf et al., (2010) desarrollaron un ACV para el cultivo de la caña de azúcar. Reportan la contribución de esta etapa en tres indicadores punto medio: Energía no renovable (categoría punto final de recursos) con 536.8 MJ de energía primaria, el Calentamiento global (categoría punto final de cambio climático) tiene una contribución de 114.5 kg de CO₂ eq, y para la Acidificación terrestre (categoría punto final de la calidad del ecosistema) una contribución de 5.28 kg SO₂ eq. Los resultados de este estudio fueron 5,169.5 MJ de energía primaria, 456.7 kg de CO₂ eq y 88.5 kg SO₂ eq respectivamente. Esto demuestra que la carga ambiental fue mucho mayor en este estudio. Además, Marguerite A Renouf et al., (2011) analizan solo la etapa de procesamiento de la caña de azúcar; los resultados de los tres modelos analizados se promedian y se informan en tres categorías punto medio. La contribución de la categoría Energía no renovable fue 3,320.0 MJ de energía primaria, en la categoría de Calentamiento global se estima que los impactos contribuyen con 483.7 kg de CO₂ eq, y para la categoría de Acidificación terrestre, las emisiones generadas representan 36.9 kg SO₂ eq. Comparando los

resultados anteriores con los estimados en este estudio (8,572.9 MJ de energía primaria, 1,156.1 kg de CO₂ eq y 104 kg SO₂ eq respectivamente), se puede demostrar que las cargas ambientales de este estudio son mayores. Seabra et al., (2011) estimaron un total de 234 kg de CO₂ equivalente por tonelada de azúcar estándar. En comparación con los 1.156,1 kg de CO₂ eq estimados en este análisis, se observa que este último dato proporciona una mayor carga ambiental.

La ocupación de tierra en la región central de Veracruz es baja. Los rendimientos en los últimos diez años promedian 64 ton azúcar/ha (CONADESUCA, 2016a); sin embargo, si las prácticas agrícolas no mejoran para obtener mejores rendimientos de caña de azúcar, las consecuencias pueden traer inevitablemente un aumento de la ocupación de la tierra.

La aplicación de fertilizantes representa una carga contaminante muy alta y esto se refleja en las categorías punto final. Los resultados muestran que la etapa de la Agricultura de caña tiene una carga ambiental alta, ampliamente explicada por el uso de fertilizantes NPK en los campos agrícolas. Desafortunadamente, el ICV muestra que la cantidad de urea utilizada es de 20.98 kg/ton azúcar estándar, cloruro de potasio 18.24 kg/ton azúcar estándar, fosfato diamónico 9.12 kg/ton azúcar estándar y sulfato de amonio 18.24 kg/ton azúcar estándar. Las tasas de fertilización mencionadas anteriormente muestran una utilización de 8,225,853.44 de kg de fertilizantes aplicados por año. La Figura 5.5 muestra la contribución ambiental de la materia prima y la energía en la etapa de la Agricultura de caña. En esta etapa, es difícil para los agricultores estimar la tasa correcta de fertilizantes NPK. Si bien los laboratorios de análisis de suelos llevan a cabo recomendaciones, en la mayoría de los casos estas recomendaciones no se siguen ya que a menudo los datos son confusos, la recomendación viene con información inexacta o contradictoria, y la interpretación de esta información es complicada porque se requiere de expertos en el agrícola.

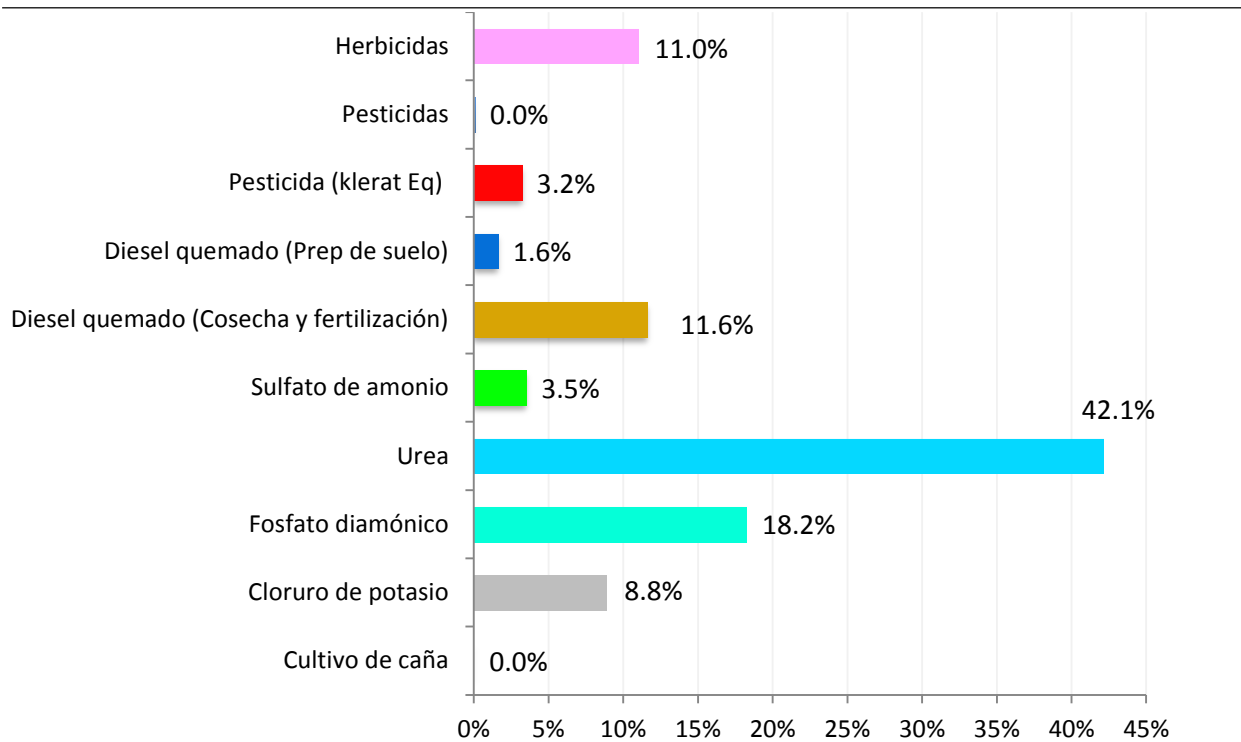


Figura 5.5 Contribución de la etapa de agricultura de caña de azúcar.

A partir de los resultados obtenidos en la agricultura de caña, los interesados de la empresa Excelencia Cañera decidieron dejar de utilizar la Urea como fertilizante, en su lugar optaron por el fertilizante nitrogenado Nitromag, sin embargo, para conocer el impacto ambiental de este agroquímico se requiere un nuevo estudio de ACV. También es importante mencionar que la cantidad de hectáreas a cargo de empresa es pequeña, por lo que es recomendable que los productores independientes empiecen a dejar de utilizar la Urea y migren a otros fertilizantes. El uso de fertilizantes en la producción de caña de azúcar es muy alto, no basta con dejar de utilizar aquellos agroquímicos que representen un peligro ambiental, es necesario también desarrollar nuevas herramientas que mejoren la agricultura de precisión, y para enfrentar este tipo de problema, Chen et al., (2008) propone el uso de Inteligencia Artificial (IA) para el modelado ambiental. Es decir, propone sistemas de apoyo a las decisiones basados en IA como una herramienta alternativa para estimar las tasas correctas de fertilizantes. Otras alternativas pueden ser el uso de fertilizantes orgánicos de residuos de caña de azúcar y el manejo adecuado de los recursos hídricos. Alrededor del 82% de la caña de azúcar cosechada se levantó mecánicamente, lo que implicó el alto consumo de diésel en los equipos de cosecha,

y resultó en una alta carga ambiental en el Cambio climático y Salud humana respectivamente. Se deberían implementar tecnologías más limpias para reducir las emisiones de CO₂ generadas por las operaciones de cosecha mecanizadas. La manufactura, la aplicación de fertilizantes, el diésel quemado en la cosecha y, en menor medida, la producción y el uso de herbicidas contribuyen en categorías como Inorgánicos respirados, Calentamiento global y Energía no renovable. Por lo tanto, es esencial reducir y monitorear estos factores con el objetivo de mejorar el desempeño ambiental.

En la etapa de transporte de la caña de azúcar, se generan grandes cantidades de CO₂ en el Cambio climático, la Salud humana y los Recursos. Transportar la caña de azúcar al ingenio azucarero es el proceso que más contribuye. Actualmente, el transporte se realiza íntegramente por carretera. El alto número de camiones, la antigüedad de estos vehículos, además de la ineficiencia en el enrutamiento está generando grandes impactos. El transporte de caña de azúcar al ingenio azucarero ocupa el segundo lugar con el mayor impacto ambiental y, finalmente, con una contribución menor a la producción y el uso de diésel. Una alternativa para mitigar estos impactos podría ser optimizar las rutas de transporte de la caña de azúcar a través de algoritmos matemáticos que permitan minimizar las emisiones de CO₂. Otras opciones son la renovación de la flota de camiones, cambiar o mejorar la eficiencia de los combustibles o transportar la caña de azúcar por otros medios más amigables con el medio ambiente.

La cogeneración de electricidad contribuye significativamente; la razón principal se debe a la ineficiente combustión del bagazo que genera sustancias inorgánicas que son liberadas al aire y causan efectos peligrosos en la Salud humana y la Calidad del ecosistema. Además, las emisiones del suelo causan altos niveles de toxicidad. Aunque existen beneficios ambientales al ocupar el bagazo para producir energía; es necesario reforzar o aplicar medidas políticas efectivas para el control de las emisiones al aire por la quema de bagazo. En México, instituciones como SEMARNAT o PROFEPA deberían crear nuevas políticas más responsables con el medio ambiente. Además, según lo propuesto por Toolseeram Ramjeawon (2008), las fábricas de azúcar deben estar equipadas con sistemas eficientes de eliminación de

cenizas volátiles; asimismo, monitorear y controlar esta área a través de un departamento del medio ambiente.

5.2 Resultados del SEAD

Para determinar las tasas de NPK, fue necesario el conocimiento previo de las propiedades edáficas, así también la información nutricional del suelo a partir de los análisis del suelo y los rendimientos de caña de azúcar. Todas estas propiedades tienen una fuerte correlación con el crecimiento adecuado de la caña de azúcar. En ambos modelos, el centro de gravedad se utilizó como método de defuzzificación. Los resultados de las 160 pruebas para ambos modelos se muestran a continuación. Se utiliza el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar la calidad de los modelos al replicar los resultados. En la ecuación 5.1 se observa la representación matemática de R^2 .

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad \text{Ec 5.1}$$

Donde SEE es la suma de cuadrados del modelo de regresión, y SST es la suma total de cuadrados. A continuación, en la Figura 5.6 se muestra el coeficiente de determinación obtenido al realizar las pruebas con el GE2 ($R^2 = 0.9161$ del modelo CED-M).

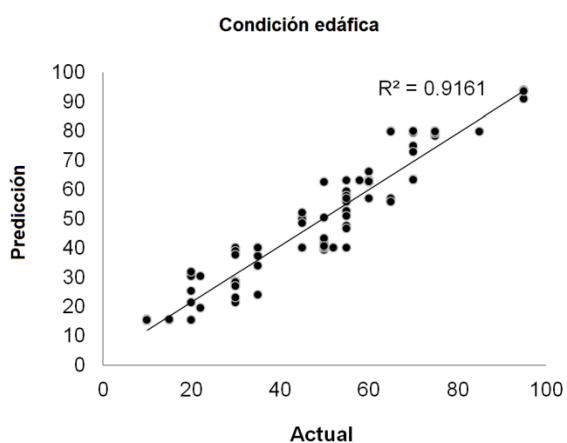


Figura 5.6 Coeficiente de determinación de la condición edáfica del modelo CED-M.

A continuación, en la Figuras 5.7, 5.8 y 5.9, se observan los coeficientes de determinación de las salidas NPK, obtenidos por el GE2. La tasa de N muestra un $R^2 = 0.981$ para las pruebas

realizadas con el SEAD y un $R^2 = 0.963$ para los resultados obtenidos por los análisis de suelo. La tasa de P muestra un $R^2 = 0.9702$ para las pruebas realizadas con el SEAD y un $R^2 = 0.9183$ para las pruebas obtenidas por los análisis de suelo. La tasa de K muestra un $R^2 = 0.9691$ para las pruebas realizadas con el SEAD y un $R^2 = 0.9663$ para las pruebas obtenidas por los análisis de suelo. Los coeficientes de determinación reportados en las figuras indican que hay una tendencia más cercana a 1 de los modelos diseñados por la lógica difusa. Por lo tanto, se observa que el SEAD es el que mejor se adapta a los resultados obtenidos por los expertos, a diferencia de los resultados obtenidos por el análisis del suelo.

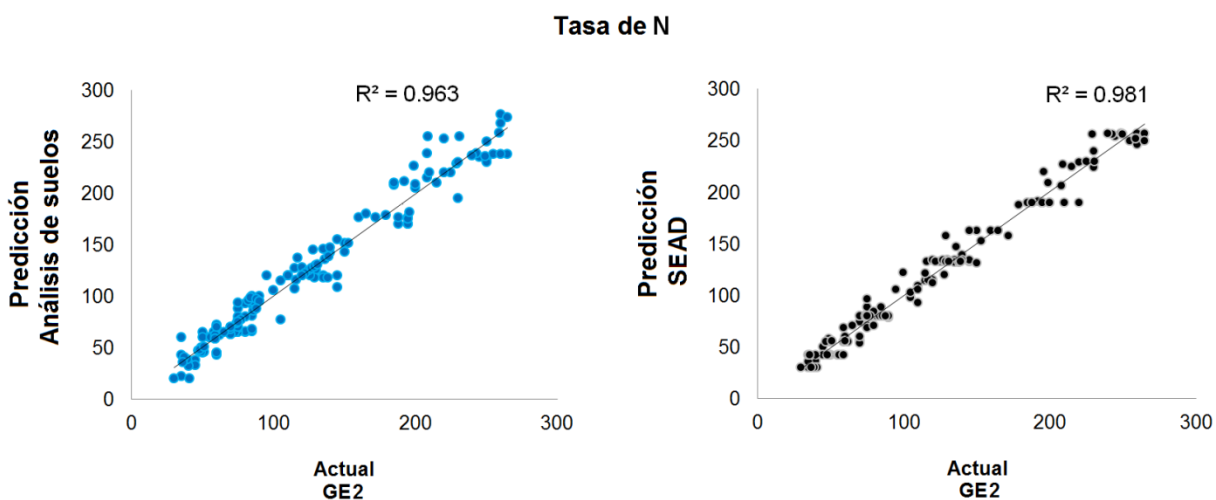


Figura 5.7 Coeficiente de determinación de la tasa de N (del modelo NPK-M).

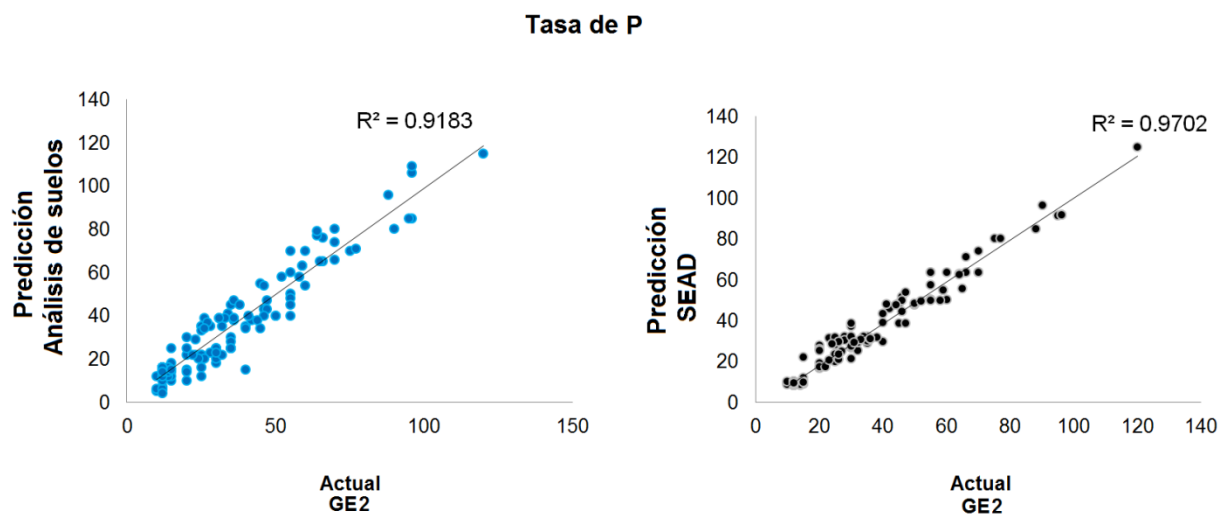


Figura 5.8 Coeficiente de determinación de la tasa de P (del modelo NPK-M).

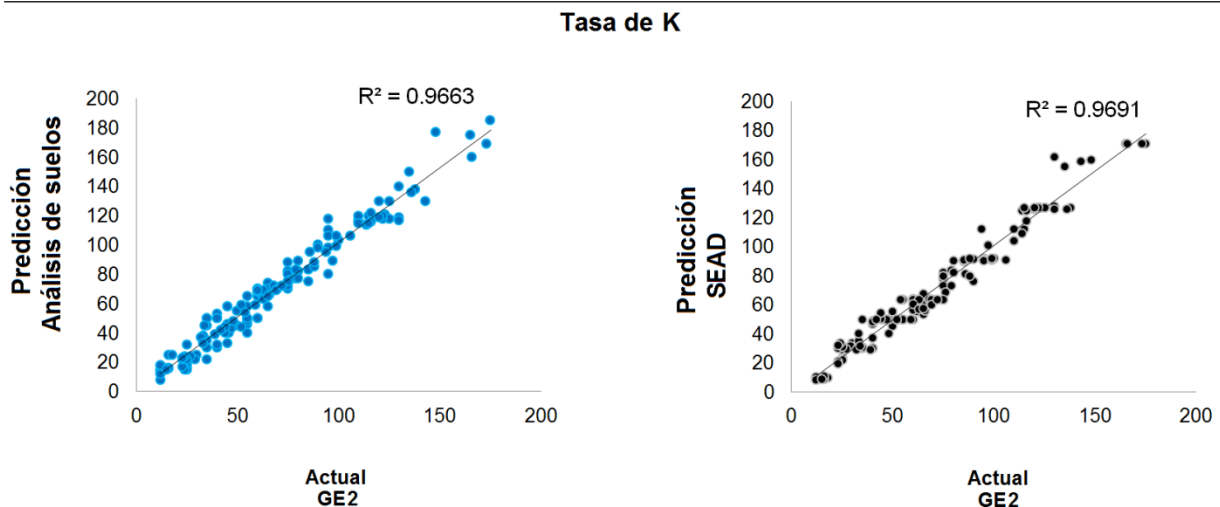


Figura 5.9 Coeficiente de determinación de la tasa de K (del modelo NPK-M).

5.2.1 Análisis con la metodología de superficie de respuesta

Un análisis de la metodología de la superficie de respuesta (incluido en el software Labview) también se incluye en los resultados de este trabajo. Con este análisis, se obtienen resultados relacionados con el impacto que tienen dos variables de entrada con respecto a una variable de salida.

En la Figura 5.10, se analizan las variables que tienen el impacto más significativo en la prueba 1 en ambos modelos. En el gráfico de la condición edáfica, el color rojo indica (zona óptima) que existe una condición edáfica aceptable para producir caña de azúcar. Por ejemplo, la gráfica de la superficie de respuesta de las variables de pH y MOS (modelo CED-M) se analiza con la información de la prueba No. 3: existe una condición edáfica aceptable si el pH del suelo se mantiene en un rango de 0 a 2.6 y la MOS fluctúa entre 4.8 y 5.6 %. En la figura de la tasa de N (del modelo NPK-M), la zona roja indica que si el N disponible fluctúa entre 60 y 100 (kg/ha) y la Condición edáfica fluctúa de 5 a 39, la tasa de N será alta.

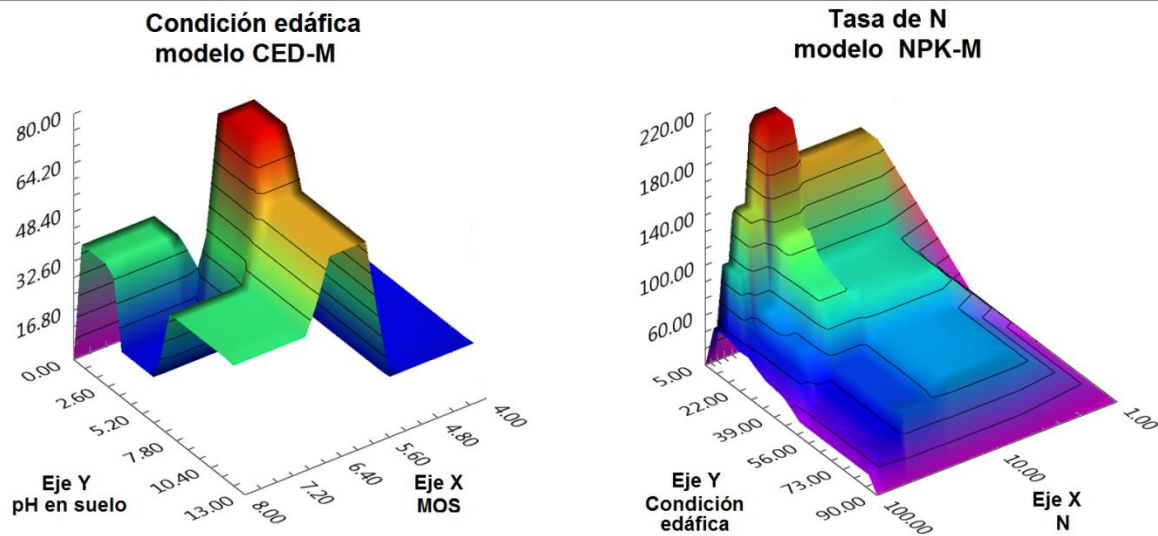


Figura 5.10 Análisis de superficie de respuesta de los modelos.

5.2.3 Discusión y recomendaciones de los resultados obtenidos

La organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estima que el uso global de fertilizantes podría aumentar en más de 200.5 millones de toneladas en 2018 (FAO, 2018). En consecuencia, también aumentaría el daño ecológico debido a la sobre-fertilización. Una forma de mejorar las prácticas agrícolas es a través de la minimización y el monitoreo constante de la aplicación de fertilizantes, con el propósito de mejorar el desempeño ambiental y los rendimientos de la caña de azúcar. En la actualidad, los ingenios azucareros y los agricultores en México no calculan correctamente las tasas de fertilizantes que ocupan en los campos de caña de azúcar. Si bien existen recomendaciones como las que ofrecen los laboratorios, estos datos a menudo son inexactos, contradictorios o confusos. Con frecuencia, estas recomendaciones no reflejan las tasas correctas que requieren los campos de caña de azúcar; por lo tanto, tomar decisiones basadas en lo anterior es lo menos indicado. Además, en la mayoría de los casos, la interpretación de esta información es complicada porque se requieren expertos en el área agrícola por lo tanto es recomendable el uso de un SEAD como en que se describe anteriormente.

Los IC se utilizan para hacer frente a la incertidumbre incluida en las FM. Con esta herramienta, la asignación de los parámetros de los intervalos (límite inferior unilateral y límite superior unilateral) en las distribuciones trapezoidales es más precisa; por lo tanto, las

tasas de NPK estimadas en los modelos difusos son más precisas. Con respecto al uso de funciones trapezoidales, se prefiere usar esta función porque simplificó los cálculos y se obtuvo una buena precisión en los resultados. Los modelos están diseñados con el apoyo de ingenieros agrónomos. Sin embargo, para que estos modelos no estuvieran sesgados a la experiencia de estos profesionales, se llevó a cabo una ronda de validación con el GE2, donde se incluye la incertidumbre en el modelo para evitar fallas en otras realidades diferentes de la región central del estado de Veracruz.

Ambos modelos son esenciales para este estudio. Sin embargo, es interesante observar que el modelo EDC-M tiene un alto grado de importancia porque es esencial para reducir el consumo de fertilizantes. En este modelo, el análisis de la superficie de respuesta identificó el CE y la CTS como las variables que pueden mejorar la condición edáfica hasta un 80%. Además, cualquier combinación de la variable CE con las variables pH, MOS y IAN genera indicadores mayores al 70%. En el modelo NPK-M, la disponibilidad actual de N combinada con los resultados de la condición edáfica y el REC disminuyen o aumentan las tasas de N. La tasa de P correcta es afectada en menor medida por la disponibilidad de P y cualquier combinación de las variables restantes. La tasa de K está influenciada principalmente por la condición edáfica y la cantidad disponible de K. Finalmente, las variables como la condición edáfica y la disponibilidad de macronutrientes NPK en los suelos influyen de manera decisiva para estimar las tasas correctas de fertilizante NPK.

Los coeficientes de determinación de la tasa de K son muy similares. Por lo tanto, sería útil estudiar estrategias que mejoren los indicadores de SEAD. Mejorar las tasas de éxito de los coeficientes; primero, podría aumentar el número de FM en las tres variables de salida. Actualmente, el modelo NPK-M tiene siete (muy bajo, bajo, medio bajo, medio, medio alto, alto y muy alto) para cada variable de salida, y el centroide está limitado para calcular el centro de gravedad de cada imagen de esos intervalos; esto provoca una distribución incorrecta de los residuos. Otra alternativa es agregar variables al modelo, por ejemplo, acidez intercambiable, variables climáticas o variables que explican en detalle los índices de humedad en el suelo (punto de marchitamiento permanente, capacidad del campo o saturación de agua). La variable CTS también podría modificarse por tres variables, con el propósito de

explicar mejor la textura de los suelos, por ejemplo, el porcentaje de arcilla, limo y arena. Finalmente, otra recomendación será llevar a cabo otro modelo que analice el impacto de nutrientes secundarios como el calcio, magnesio, cobre, zinc, manganeso y hierro en la nutrición de los suelos y con el apoyo de los IC para obtener mejores resultados.

En la actualidad, las prácticas agrícolas en México son ineficientes, especialmente en la agricultura de la caña de azúcar. Por un lado, los agricultores a menudo reciben datos complejos, inexactos o contradictorios; en otras ocasiones, las organizaciones agrícolas públicas no apoyan a los agricultores con las recomendaciones necesarias para aplicar fertilizantes. Los costos y la falta de interés de los agricultores en llevar a cabo el análisis del suelo también afectan. Además, la gran variedad de tipos de suelo que existen en el territorio mexicano dificulta la estimación de las tasas correctas de nutrientes; por lo tanto, las actividades agrícolas enfrentan desafíos inusuales que podrían mejorarse a través del uso de esta herramienta. Si el SEAD se implementa correctamente y los análisis de suelo se realizan periódicamente, esta herramienta podría ser fundamental para cumplir con las tareas y lograr los objetivos ambientales. La desventaja de este SEAD es que podría no ser eficiente si no se alimenta adecuadamente con datos confiables. El SEAD consta de dos modelos difusos, sin embargo, para un mejor asesoramiento; los resultados se pueden mostrar de forma independiente.

5.3 Resultados de la optimización multiobjetivo

La optimización multiobjetivo se llevó a cabo en toda la cadena de suministro de la producción de azúcar estándar, que incluye la agricultura de caña, el transporte de caña, la fábrica (manufactura de azúcar estándar) y la cogeneración de electricidad (a partir de la combustión del bagazo). Partiendo del modelo actual, la optimización se realizó con el software Multigen, una vez encontrada la convergencia se generó el conjunto de datos de posibles soluciones.

La optimización incluye cuatro criterios ambientales (Salud humana, Calidad del ecosistema, Cambio climático y Recursos) basados en las categorías punto final (end-point categories) de los resultados del ACV, y también incluye un criterio económico (Costo total), basado en los

costos de las materias primas y energía utilizados en la cadena de suministro de la producción de azúcar de caña. Las variables de decisión fueron 25 y se describen en el capítulo 4. La optimización multiobjetivo permitió la búsqueda de las soluciones óptimas, es decir, aquellas soluciones que se encuentren lo más próximas a la solución ideal. A continuación en las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 en tres dimensiones, se observan los resultados de los frentes de Pareto obtenidos en la optimización del modelo.

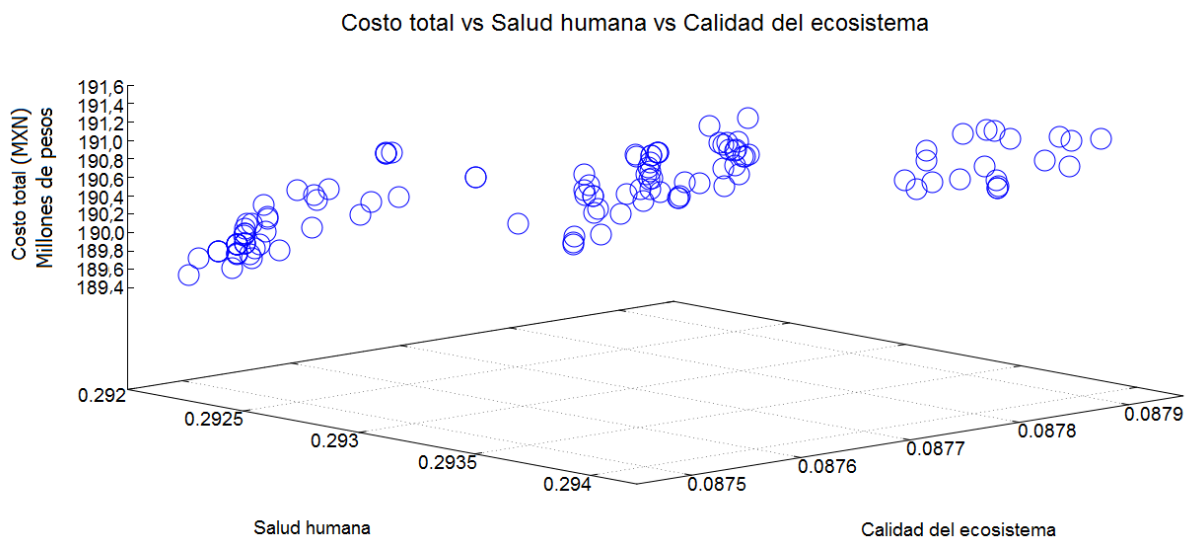


Figura 5.11 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs calidad del ecosistema

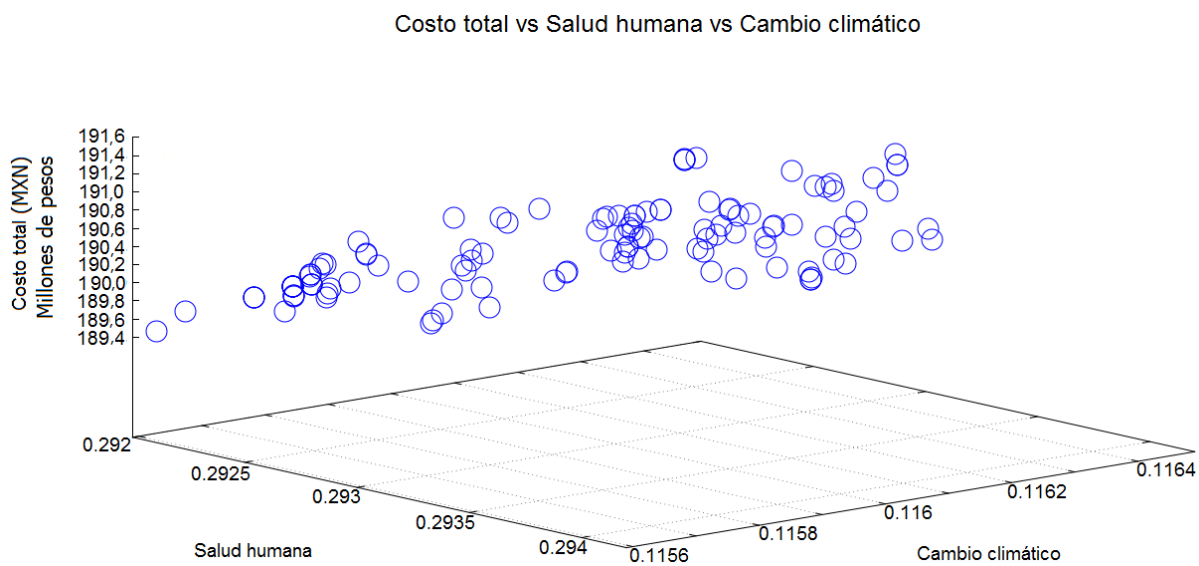


Figura 5.12 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs cambio climático

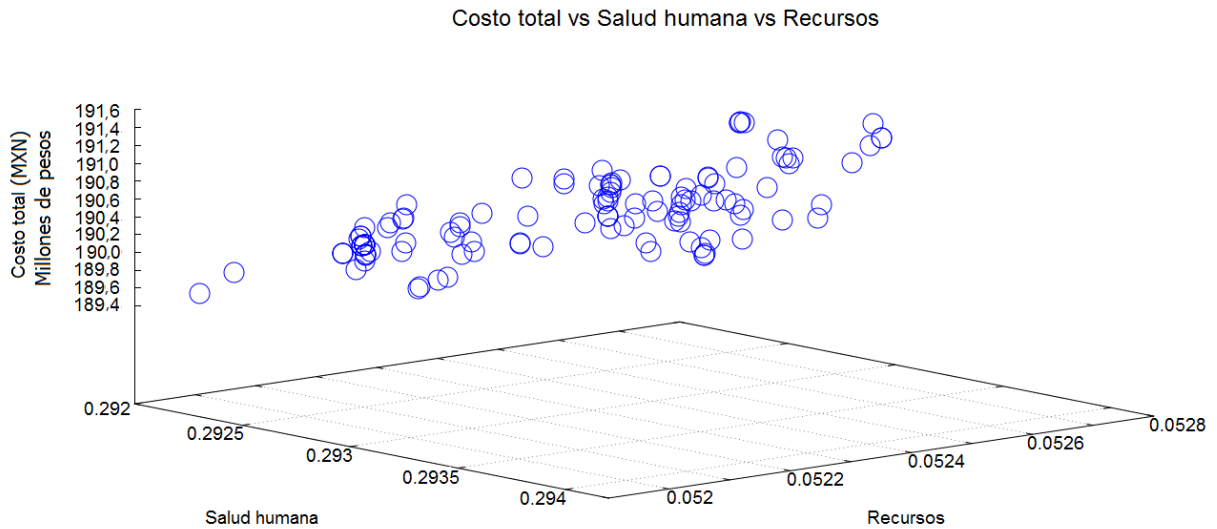


Figura 5.13 Frente de Pareto costo total vs salud humana vs recursos

En la Figura 5.14 se muestran los frentes de Pareto restantes, las combinaciones son las siguientes. En la Figura [A] se enfrentan el costo total vs cambio climático vs la calidad del ecosistema, en la Figura [B] se enfrentan el costo total vs la calidad del ecosistema vs los recursos, y en la Figura [C] se enfrentan el costo total vs cambio climático vs recursos.

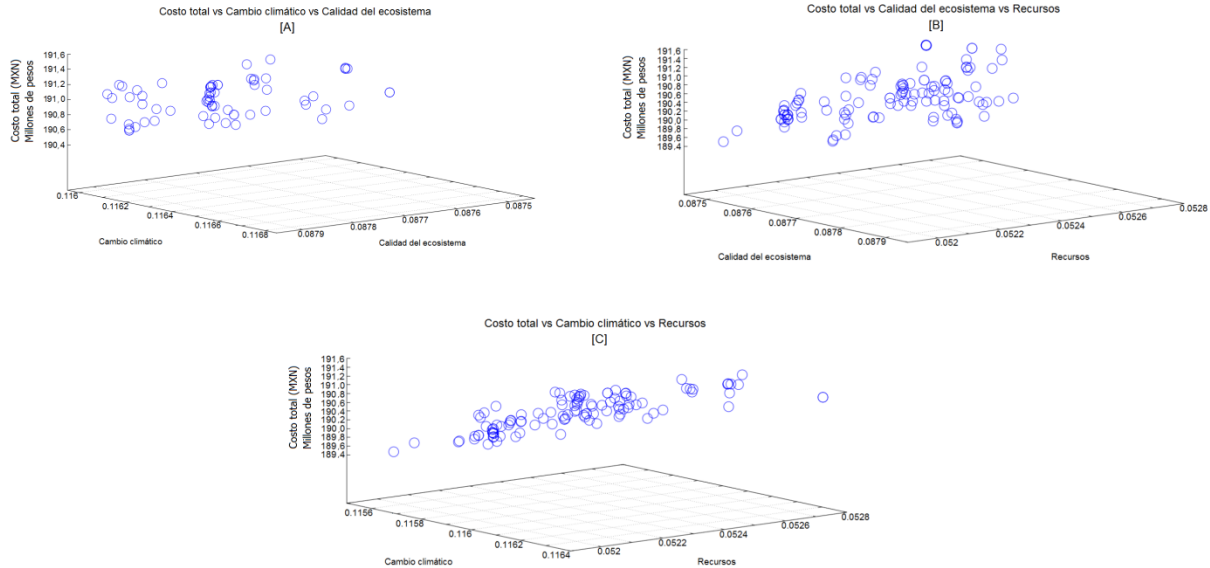


Figura 5.14 Frentes de Pareto restantes

Las soluciones factibles fueron 120, todos los casos representan una solución factible y corresponde a los interesados elegir la opción que mejor convenga. En los resultados se puede observar que en la mayoría de los casos, los resultados muestran una reducción en los

impactos y los costos. Sin embargo, en esta etapa convendría utilizar una herramienta que ayude a tomar mejores decisiones con respecto a que solución es la mejor para elegir. En la Tabla 5.2 se observa una fracción de 25 soluciones factibles del problema.

Tabla 5.2 Fracción de soluciones factibles del problema

No. de soluciones	Salud humana (DALY)	Calidad del ecosistema (PDF*M2*Yr)	Cambio climático (Kg CO ₂ eq)	Recursos (MJ primary)	Costos totales
1	0.292223908	0.087485269	0.115703267	0.052164443	189831332
2	0.292223908	0.087485269	0.115703267	0.052164443	189831332
3	0.292223908	0.087485269	0.115703267	0.052164443	189831332
4	0.292092802	0.087486444	0.115595167	0.051974763	189510762.5
5	0.292133213	0.087487124	0.115626931	0.052017265	189717050.7
6	0.292270337	0.087488986	0.11573526	0.052169199	189662378.9
7	0.292308926	0.087492197	0.115763548	0.052164443	189948157.2
8	0.292308926	0.087492197	0.115763548	0.052164443	189948157.2
9	0.292308926	0.087492197	0.115763548	0.052164443	189948157.2
10	0.292871819	0.087673125	0.115753103	0.052058611	189848553.5
11	0.292842289	0.087628915	0.115796824	0.052161376	190149166.1
12	0.292305549	0.087491955	0.115761617	0.052162066	190031547.4
13	0.292331392	0.087494058	0.115779894	0.052162303	189793871.1
14	0.292884972	0.087671574	0.115765369	0.052101859	189945019.4
15	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711	189931879.6
16	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711	189931879.6
17	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711	189931879.6
18	0.29228497	0.087490035	0.115743628	0.052179503	189820850.4
19	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711	189931879.6
20	0.29228384	0.08748995	0.11574298	0.05217871	189931880
21	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711	189931880
22	0.292874071	0.087673286	0.11575439	0.052060197	189872934
23	0.2923078	0.087492117	0.115762904	0.052163651	190056652
24	0.2923078	0.087492117	0.115762904	0.052163651	190056652
25	0.292329346	0.087493884	0.115778335	0.052162858	190164905

5.3.1 Selección de soluciones factibles con el método TOPSIS

El método TOPSIS es una herramienta de apoyo a las decisiones, y consiste en elegir soluciones factibles que se encuentren más cercanas a la solución ideal y lejos de la peor solución. En el diseño de la matriz de decisión ponderada, la ponderación se eligió de acuerdo a las preferencias de los interesados. En las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17 se presentan las primeras

10 soluciones factibles enfrentando diferentes criterios. El punto rojo representa la solución más próxima a la ideal con una distancia euclidiana de 0.000308277. Las

10 soluciones factibles se encuentran en anexos Tabla 1c.

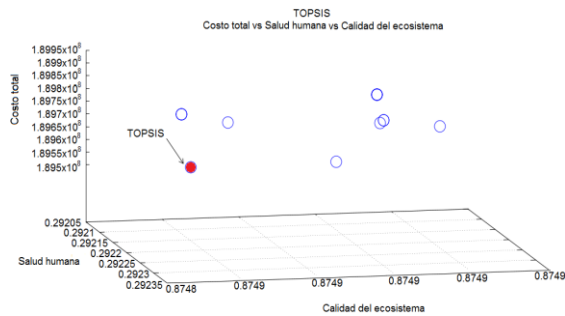


Figura 5.15 Solución factible de TOPSIS costo total vs salud humana vs calidad del ecosistema

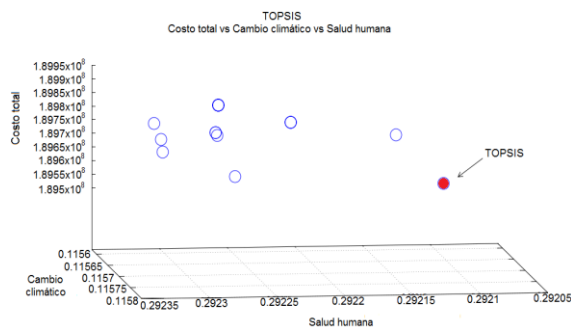


Figura 5.16 Solución factible de TOPSIS costo total vs cambio climático vs salud humana

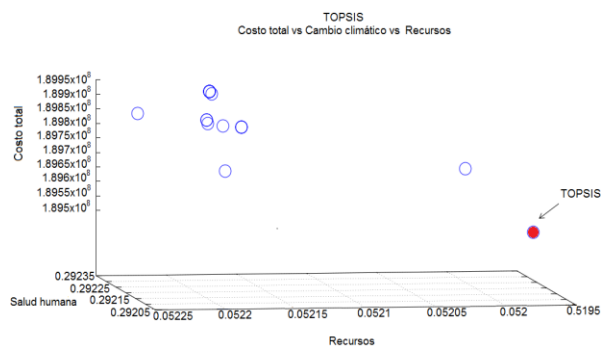


Figura 5.17 Solución factible de TOPSIS costo total vs salud humana vs recursos

5.3.2 Análisis de escenario de la mejor solución factible de TOPSIS

Los resultados en el modelo actual (2016) muestran que se producen 123,633.85 toneladas de azúcar estándar, teniendo ese nivel de producción, se están generando los impactos ambientales que se describen al inicio de este capítulo (estudio de ACV). En la Tabla 5.3 se muestra una comparación de los resultados del modelo actual vs los resultados del modelo optimizado con los datos de la solución factible No. 1, así también se describe la diferencia de los impactos medios de los dos modelos.

Tabla 5.3 Comparación de los resultados del modelo actual vs modelo optimizado

Categoría de impacto	Unidad	Modelo actual	Modelo propuesto OMAG-TOPSIS	Diferencia
Carcinógenos	kg C2H3Cl eq	16.10	15.58	3.2%
No-carcinógenos	kg C2H3Cl eq	51.55	50.90	1.3%
Inorgánicos respirados	kg PM2.5 eq	2.77	2.74	1.3%
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	4,867.83	4,683.41	3.8%
Depleción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.000108	0.00	1.3%
Orgánicos respirados	kg C2H4 eq	0.37860	0.36	4.1%
Ecotoxicidad acuática	kg TEG water	352,031.60	350,435.15	0.5%
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG soil	137,359.96	136,129.84	0.9%
Acidificación terrestre/nutri	kg SO2 eq	102.56	96.74	5.7%
Ocupación de tierra	m2org.arable	6.22	5.95	4.5%
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,164.23	1,182.21	-1.5%
Energía no-renovable	MJ primary	8,742.74	8,232.41	5.8%
Extracción mineral	MJ surplus	17.00	16.34	3.8%

En la Figura 5.18 se observa el cambio en la distribución del origen de las emisiones, basado en la comparación de los resultados del modelo actual con los resultados de obtenidos por el modelo optimizado. Así también, en cada barra se observa la participación de cada subsistema (agricultura, transporte, fábrica y cogeneración de electricidad) y su contribución en el porcentaje de impacto ambiental.

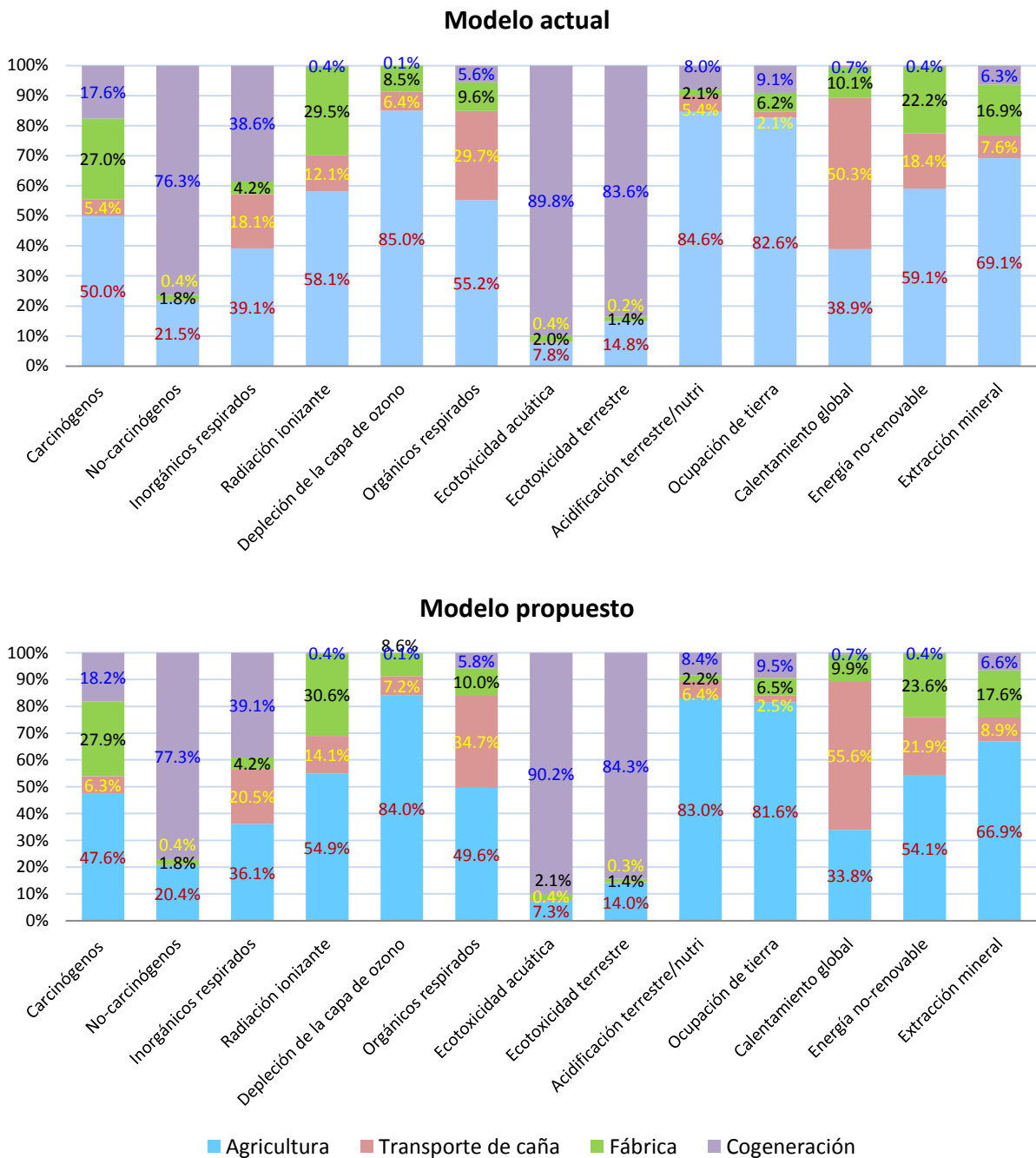


Figura 5.18 Redistribución del origen de las emisiones de los impactos medios

Los datos que se muestran en la Figura 5.19 corresponden a la reducción en porcentajes de los trece impactos medios evaluados en este trabajo de investigación.

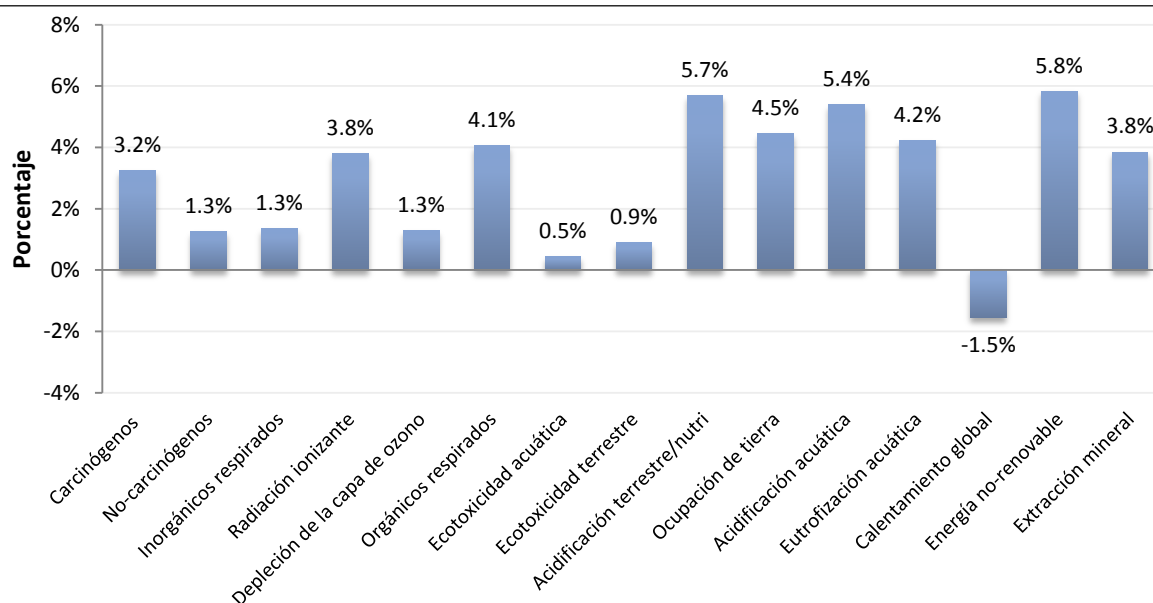


Figura 5.19 Porcentaje de reducción de los impactos medios

En el caso del calentamiento global (global warming), los resultados muestran un incremento del -1.5%, es decir, actualmente se están produciendo 1,164.23 kg CO₂ eq/ton azúcar estándar, y en la optimización la producción se incrementó hasta 1,182.21kg CO₂ eq/ton azúcar estándar. En el uso de la energía no renovable (Non-renewable energy), actualmente se están generando 8,742.74 MJ primary/ton azúcar estándar y se observa una reducción a 8,232.41MJ primary/ton azúcar, produciendo así una reducción significativa del 5.8%.

Las categorías de impacto punto final (endpoints) representan las funciones objetivo a minimizar, los resultados de la optimización generaron una nueva distribución del origen de las emisiones de estas categorías. En la Figura 5.20 se observan las nuevas distribuciones de los impactos punto final en las cuatro categorías de impacto (agricultura, transporte, fábrica y cogeneración)

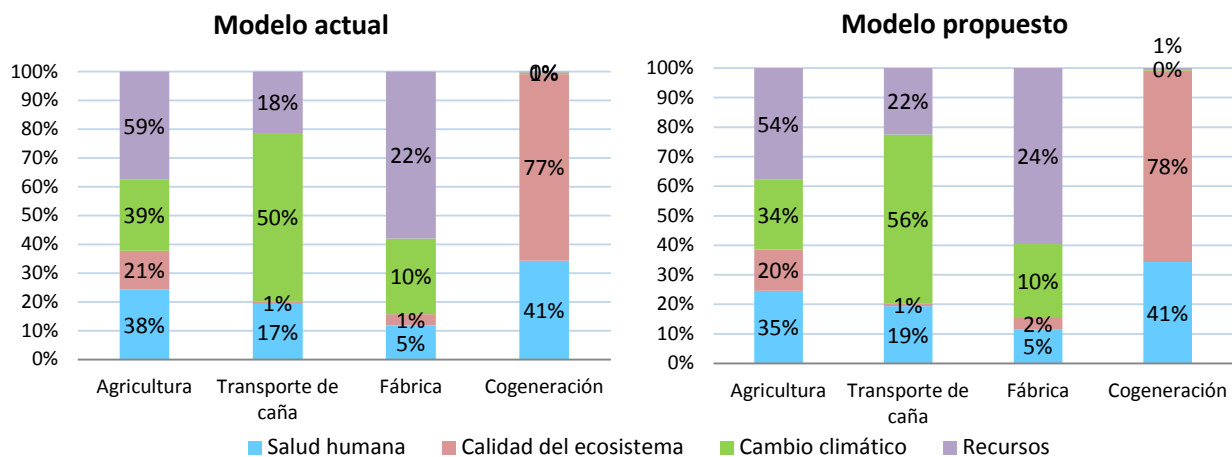


Figura 5.20 Redistribución del origen de las emisiones de las categorías

En la Tabla 5.4, se describe un resumen del total de impactos en categorías finales, los residuales del modelo y los porcentajes de reducción para categoría.

Tabla 5.4 Comparación de la categorías punto final (modelo actual vs optimizado)

Categoría de impacto	Unidad	Modelo actual	Modelo optimizado	Diferencia
Salud humana	DALY	0.30035	0.29622	0.0041
Calidad del ecosistema	PDF*M2*Yr	0.08888	0.08770	0.0012
Cambio climático	Kg CO ₂ eq	0.11701	0.11882	-0.0018
Recursos	MJ primary	0.05752	0.05417	0.0034

Los porcentajes de reducción en cada categoría punto final (endpoint) se observan en la Figura 5.21. La categoría que mayor porcentaje de reducción mostro fue la de recursos, seguida de la categoría de impacto cambio climático.

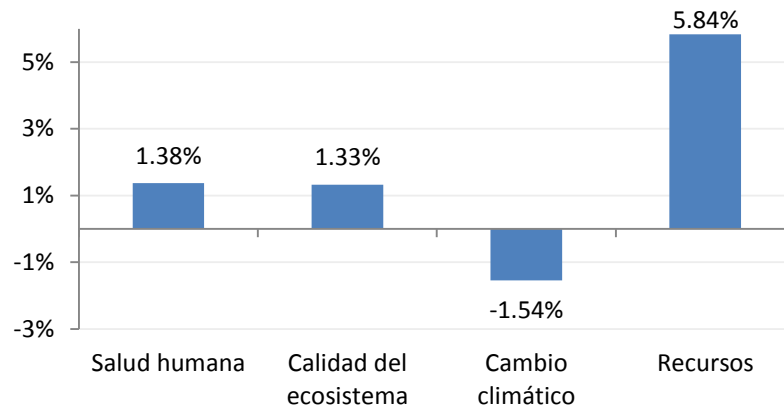


Figura 5.21 Porcentaje de reducción de las categorías punto final.

Los costos totales incluyen materia prima y energía. Por ejemplo, los costos por agroquímicos, los combustibles fósiles, uso de energía y uso de otros químicos como la cal. El costo total por uso de bagazo no se incluyó en este análisis, ya que este costo es incluido cuando se realiza el pago de la caña de azúcar, como se explicó en el capítulo 3. En la Tabla 5.5, se desglosan los costos generados por materia prima y energía en la cadena de suministro.

Tabla 5.5 Comparación de costos entre el modelo actual vs modelo optimizado

Materia prima	Subtotal Modelo actual	Subtotal Modelo optimizado	Porcentaje de reducción
Costos de la agricultura			
Fertilizantes	\$68,664,970.10	\$64,486,666.15	6.09%
Pesticidas	\$12,436,648.01	\$12,469,887.18	-0.27%
Herbicidas	\$4,244,647.85	\$4,244,647.85	0.00%
Diésel	\$77,871,881.64	\$69,554,375.62	10.68%
Costos de transporte			
Costo total de diésel	\$29,311,121.11	\$29,311,121.11	0.00%
Costos totales fábrica			
Electricidad CFE	\$255,685.17	\$255,685.17	0.00%
Cal	\$5,898,405.35	\$5,898,405.35	0.00%
Combustóleo	\$2,726,195.58	\$2,726,195.58	0.00%
Cogeneración de electricidad	\$0.00	\$0.00	0.00%
Totales	\$201,409,554.80	\$188,946,984.01	6.19%

Como se describe en la tabla anterior, los costos de la etapa agrícola son los que mayor impacto en porcentaje de reducción han tenido, en el caso de los costos de transporte, los costos de la fábrica y la cogeneración de electricidad no mostraron un porcentaje de reducción. Aunque la reducción de los costos es pequeña tiene un impacto significativo que podría beneficiar principalmente a los productores de caña.

5.3.3 Discusión y recomendación de los resultados de la optimización multiobjetivo

Los resultados del ACV en la cadena de suministro de la producción de azúcar estándar muestran que las etapas con mayor impacto ambiental son la agricultura, la cogeneración, el transporte y la fábrica. La optimización multiobjetivo requirió previamente del desarrollo de un modelo de SMC que incluye las cuatro etapas de producción de azúcar estándar, durante el desarrollo se identificaron parámetros inciertos en cada una de las etapas. Los resultados del modelo de SMC fueron muy parecidos a los resultados obtenidos en el estudio de ACV, mostrando diferencias no significativas en algunos de sus parámetros, por ejemplo en las cantidades de fertilizantes que aplican en los campos agrícolas. Con respecto a los agroquímicos restantes y la energía usada en toda la cadena de suministro, las estimaciones no tuvieron variaciones significativas. Los resultados del modelo de SMC confirman lo que el estudio de ACV demostró, que la etapa con mayor impacto ambiental es la agricultura de caña, siendo el uso de agroquímicos lo que mayor impacto tiene en el aire, el suelo y el agua. El análisis de sensibilidad muestra que en la agricultura factores como los requerimientos de nitrógeno, el rendimiento esperado de caña, el costo de aplicar pesticidas, la calibración adecuada de equipos (pesticidas), el mantenimiento (labores mecánicas), las mezclas y procedimientos de aplicación de herbicidas, así como el uso de diésel en la caña cosechada y levantada mecánicamente tienen un impacto significativo en la agricultura. En el transporte de la caña, factores como el rendimiento de diésel (l/km) por las carretas jaladas por tractores que cargan hasta 6 toneladas tiene el mayor impacto del modelo. En la fábrica, factores como las fallas en el servicio de iluminación, impurezas en la caña por cosecha mecánica (uso de cal), el porcentaje de extracción de jugo (consumo de bagazo) y la combustión incompleta por causas mecánicas en el consumo de combustóleo, tienen el mayor impacto. Los resultados de este modelo permitieron el desarrollo del modelo de optimización.

La optimización multiobjetivo inicia a partir del modelo de SMC. Este modelo al incluir incertidumbre no es recomendable para su optimización, por este motivo fue transformado a un modelo con parámetros puntuales para que pudiera ser optimizado. La optimización multiobjetivo incluye cinco funciones objetivo, cuatro son de tipo ambiental y la última es de tipo económico. Las funciones objetivo se eligieron con el propósito de minimizar el impacto ambiental y los costos por materia prima y uso de energía. Debido a la gran cantidad de impactos ambientales que se analizan durante el desarrollo del ACV (13 midpoints y 4 endpoints). En este caso, el problema de optimización no puede incluir un gran número de objetivos, debido a que diferentes autores no consideran adecuado utilizar más de cinco por diferentes razones, algunas planteadas por (Mendoza, 2013).

Los resultados de la optimización indican que existen comportamientos similares en los frentes de Pareto del costo total vs salud humana vs cambio climático, costo total vs salud humana vs recursos y costo total vs cambio climático vs recursos, esto puede indicar que existe una correlación de los resultados al comparar los criterios de los tres impactos ambientales, por lo tanto podría no ser necesario incluir dos criterios ambientales. Finalmente el problema de optimización podría formularse con dos criterios ambientales y un criterio económico.

Resultados de una solución específica. Tomando en cuenta el actual nivel de producción de azúcar estándar y la solución factible No. 1, los impactos medios (midpoints) muestran reducción en su carga ambiental, sin embargo también se puede observar que algunos impactos medios no muestran una reducción significativa, por ejemplo los cancerígenos y no-carcinógenos (1.3%), la ecotoxicidad acuática (0.5%) y la ecotoxicidad terrestre (0.9%), esto se explica principalmente por el bajo nivel de contribución que tienen etapas como el transporte, la fábrica y cogeneración, siendo únicamente la etapa de agricultura la que aporta estos indicadores. Los indicadores con mayor reducción de impacto ambiental son la acidificación y nutrificación terrestre (5.7%), la energía no renovable (5.8%), la contribución a estos dos impactos la tiene principalmente la agricultura, pero es importante subrayar que en la energía no renovable la producción y el consumo de diésel son los factores con mayor contribución. En las categorías punto final (endpoint) los resultados muestran que la

categoría cambio climático no mostro reducción del impacto ambiental, de echo sufrió un incremento de 1.54%, pasando de 0.11701a 0.11882 Kg CO₂ eq y los recursos es la categoría con mayor reducción del impacto ambiental (5.84%) pasando de 0.05752 a 0.05417 MJ primary, explicado principalmente por el uso de combustibles fósiles a lo largo de la cadena de suministro. Los costos en este modelo obtuvieron una redu56cción del 6.19%, contribuyendo principalmente en la agricultura de caña de azúcar.

Con respecto a los porcentajes de reducción de impactos, diferentes trabajos han registrados estos porcentajes como es el caso de Khoshnevisan et al., (2015) que redujeron en 27% los impactos en los inorgánicos respirados, y 35% los impactos en el calentamiento global. Morales-Mendoza (2013) calcula el porcentaje de reducción comparando tres métodos de apoyo a la decisión para elegir la mejor solución (Electre, promethee y M-topsis); los más destacados son la ecotoxicidad acuática 20.84%, 17.31% y 16.46% respectivamente y la depleción de la capa de ozono 22.46%, 18.78% y 17.77% respectivamente. Wang, Zmeureanu, & Rivard (2005) indicaron que los impactos en el diseño de edificios ecológicos pueden reducirse en un 65% si la fuente de energía del petróleo cambia a hidroeléctrica y la contribución ambiental de la construcción disminuye de 90% a 70%. En relación a los costos, antes de la optimización estos fueron de \$ 356,900 y se redujeron a \$335,200. Dufo-López et al., (2011) al analizar un sistema fotovoltaico eólico-diesel independiente con almacenamiento de batería, demostraron que el generador fotovoltaico es la fuente de electricidad más importante para los sistemas autónomos no solo ambientalmente sino también económicamente.

Con respecto a las recomendaciones, es importante mencionar que en el análisis de sensibilidad las variables con menor impacto también deberían de ser analizadas, por ejemplo en la agricultura, los porcentajes de N y P en siembra, el nivel de daño causado al cultivo, los tipos de plagas, la densidad de las malezas y actividades como la siembra, el ferticultivo, el rastreo y la rastra pulidora. En el transporte de caña, la evaluación del rendimiento tanto en carretas (de carga 10 ton). En la fábrica y cogeneración, las fallas en sistemas de aire acondicionado y servicio de oficinas por el uso de electricidad, las impurezas por levantada manual y por cosecha manual por uso de cal, y fallas en el consumo de combustóleo por

combustión incompleta debida a diferentes causas. Si se incluye un análisis con todos estos factores el modelo podría ser aún más eficiente, y se podrían obtener mejores rendimientos ambientales y minimizar aún más los costos por materia prima y uso de energía. De este modo el sistema se optimizaría mejor y se podrían obtener ahorros sin necesidad de realizar una gran inversión en el proceso.

5.4 Conclusiones

A nivel mundial la industria azucarera produce grandes cantidades de caña de azúcar y representa un ingreso esencial para las economías de los países productores. México se encuentra entre los países con mayor producción mundial de caña de azúcar. La caña de azúcar representa el bien más producido, siendo Veracruz, el estado mexicano con el mayor número de ingenios azucareros en todo el país. La industria de la caña de azúcar en México ha sido muy activa; sin embargo, ha dejado una gran huella ecológica. Los resultados de este trabajo científico destacan que el uso indiscriminado de recursos como productos químicos (por ejemplo, fertilizantes o herbicidas), combustibles fósiles, energía eléctrica u ocupación de la tierra ha causado un impacto ambiental grave para la salud humana, la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de recursos.

5.4.2 Conclusiones del ACV

El daño ambiental de esta industria azucarera ha instigado a la comunidad científica a desarrollar e implementar herramientas para estudiar el tema en profundidad. En este sentido, el ACV ayuda a comparar y cuantificar los impactos a lo largo del ciclo de vida de la caña de azúcar. La propuesta metodológica de este estudio se basa en la aplicación de ACV para cuantificar los impactos ambientales de la producción de caña de azúcar.

El estado de arte permitió sentar las bases de la metodología propuesta en esta investigación. Luego de analizar los resultados, se concluye que el ACV es una herramienta eficiente que genera buenos resultados para ser considerados en los procesos de toma de decisiones. El objetivo del ACV se cumple, ya que permite evaluar el daño ambiental atribuible a la cadena de producción de caña de azúcar (desde la cuna hasta la puerta), identificar aquellas áreas con el mayor impacto ambiental y encontrar formas de mejorar el desempeño ambiental. El

alcance del estudio ACV fue evaluar los impactos ambientales de las siguientes etapas: agricultura de caña de azúcar, transporte, molienda de azúcar y cogeneración de electricidad.

La obtención de datos para desarrollar el ICV representó una tarea complicada. Los datos estadísticos de entrada se recopilaban de la base de datos de CONADESUCA y directamente en el campo aplicando una encuesta. Para los datos de salida, se implementaron las bases de datos como SimaPro - Ecoinvent, la metodología RSB y los métodos ART. La EICV se llevó a cabo con el software SimaPro y la metodología IMPACT 2002+. Actualmente, existe una tendencia de la comunidad científica de llevar a cabo la EICV en la industria de la caña de azúcar. La evaluación de ciclo de vida implica recurrir a varias disciplinas que permiten modelar estos problemas ambientales. El ACV ha sido objeto de un enorme interés por parte de la comunidad científica para buscar redoblar esfuerzos en temas de sostenibilidad, especialmente en la producción de caña de azúcar. Esta herramienta puede apoyar el proceso de toma de decisiones y, por lo tanto, enfrentar este problema, actualmente reconocido como uno de los principales propulsores de los problemas ambientales en todo el mundo.

5.4.3 Conclusiones del SEAD

Con respecto al SEAD en fertilización, el estado del arte advierte que el cultivo de la caña de azúcar necesita cantidades equilibradas de macronutrientes en la fertilización. Sin embargo, cuando se produce una sobre fertilización provocada por datos confusos, inexactos o contradictorios, o porque no hay expertos en el área, los suelos se vuelven menos competentes para producir caña de azúcar (impacto de los rendimientos de la caña de azúcar) y aumenta la carga ambiental en los sistemas agrícolas (degradación del suelo). Para evitar estos problemas, es necesario recurrir a herramientas que ayuden a los especialistas a calcular las tasas apropiadas. En este trabajo de investigación se demuestra cómo un SEAD puede ayudar a los agrónomos, agricultores y personal de campo a estimar las tasas correctas de macronutrientes. El SEAD incluye el conocimiento y la experiencia de un grupo de expertos; Además, se incluyen los parámetros extraídos del análisis del suelo. El sistema aborda la incertidumbre de dos maneras; Primero, los IC para la media se utilizan en la arquitectura de las variables de entrada. Luego, el conocimiento de los expertos se integra en la arquitectura de algunas variables y en el mecanismo de inferencia.

El análisis con la metodología de superficie de respuesta puede respaldar el proceso de toma de decisiones en este problema. Llevar a cabo este análisis, permite a los agricultores aumentar sus rendimientos de caña de azúcar, minimizar la carga ambiental y reducir los costos de compra de fertilizantes. Los resultados más importantes de este estudio son las tasas de éxito y la identificación de las variables que tienen el mayor impacto en los modelos. Finalmente, esta herramienta es apropiada para los suelos en Veracruz, México; sin embargo, podría utilizarse en todo el país y, si se adapta a la realidad de otros países, también podría ser eficiente. Además, podría ofrecer otro beneficio si esta herramienta se adapta a otros cultivos, por ejemplo, maíz, aguacate, pastos, sorgo, entre otros. Finalmente, aunque el SEAD es eficiente, también tiene un porcentaje de error. Por lo tanto, queda abierto para corregir los posibles errores y, de esta manera mejorar en lo posible los resultados del estudio.

5.4.4 Conclusiones de la optimización multiobjetivo

El ACV es una herramienta eficiente para evaluar impactos ambientales, sin embargo, su alcance se limita solo a la evaluación de estos impactos, dejando atrás la posibilidad de buscar soluciones para minimizar los impactos ambientales. Por este motivo, se propuso el desarrollo de un modelo de optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos. La propuesta metodológica de esta etapa del trabajo incluye una combinación de Simulación Monte Carlo, Análisis de Ciclo de Vida y Optimización Multiobjetivo con Algoritmos Genéticos. El objetivo de este diseño metodológico comprende la evaluación ambiental y económica (recursos) del proceso de producción de azúcar de caña y la minimización de los aspectos ambientales y económicos a través optimización de los recursos utilizados en este proceso de producción.

La SMC apoyó en la obtención de los inventarios de entrada a través de la evaluación de la variabilidad e incertidumbre en el proceso de producción. El modelo de SMC se desarrolló para las 4 etapas involucradas (agricultura, transporte, fábrica y cogeneración), por medio de este modelo es posible obtener todos los datos de entrada del ICV cuantificando el riesgo estadístico, además también se llevó a cabo el análisis de sensibilidad que permite identificar a aquellos factores que tienen mayor impacto en el modelo, permitiendo con esta información buscar estrategias que modifiquen a las variables de decisión para obtener mejoras en el

rendimiento ambiental y económico. Los resultados de la SMC se utilizaron para llevar a cabo el ACV y obtener los resultados en materia ambiental.

La idea básica de utilizar la OMAG recae en que es una herramienta que genera un conjunto de posibles soluciones de un modelo, eliminando el juicio subjetivo del tomador de decisiones. Con esta herramienta es posible tener un abanico de soluciones factibles que puedan apoyar en la minimización de impactos ambientales y los costos de las materias primas y la energía utilizada. La problemática de esta investigación indica que los ingenios azucareros en México dependen de un alto grado de abastecimiento de energía, combustibles y recursos, los cuales al ser usados excesivamente están dejando una gran huella ambiental. Es por lo anterior, que los resultados de la optimización demuestran que con un manejo eficiente de los recursos, los combustibles y la energía, se disminuiría la huella ambiental y económica que está generando esta industria.

El estado del arte ha demostrado que la optimización con AG es eficiente en otras áreas de investigación, sin embargo, en la producción de azúcar de caña aun no existen trabajos de investigación que permitan optimizar algunas etapas del proceso; la SMC no siempre se combina con optimización como se describe en el estado del arte, sin embargo es recomendable utilizarla ya que es una herramienta vital para el análisis de incertidumbre y sensibilidad. A partir de un modelo de SMC se puede llegar al planteamiento de la optimización multiobjetivo.

La aportación de esta investigación es el diseño metodológico, que comprende el ACV, y a partir de los resultados obtenidos se desarrolla un SEAD basado en lógica difusa para estimar las tasas adecuadas de fertilizantes; además, se incluye la optimización multiobjetivo para hacer frente a las etapas de la cadena de suministro que mayor contribución tiene a los impactos ambientales generados por esta industria. En cada herramienta se desarrollaron modelos como estrategia de solución, en él, la optimización se desarrolló un modelo matemático que permite minimizar los aspectos ambientales y económicos.

Conclusiones

Y perspectivas

Conclusiones

El éxito de la industria azucarera Mexicana no ha sido gratuito en términos ambientales; esta gran dinámica económica lleva conjunta una gran huella ecológica. En esta industria, el uso indiscriminado de recursos como los agroquímicos, combustibles fósiles, energía eléctrica o uso de la tierra han causado un impacto ambiental grave para la salud humana, la calidad del ecosistema, el cambio climático y el consumo de Recursos.

En la primera etapa de estudio, la propuesta metodológica se basa en la aplicación de ACV para cuantificar los impactos ambientales de la producción de azúcar de caña. El objetivo del estudio se cumplió, ya que permitió evaluar el daño ambiental atribuible a la cadena de producción de caña de azúcar (desde la cuna hasta la puerta), e identificar aquellas áreas con el mayor impacto ambiental y encontrar formas de mejorar el desempeño ambiental. El alcance del estudio fue evaluar los impactos ambientales de las siguientes etapas: agricultura de caña de azúcar, transporte, fábrica y cogeneración de electricidad. La obtención de datos para el ICV representó una tarea complicada, se recurrió a bases de datos de la CONADESUCA y directamente en el campo aplicando encuestas. Los datos de salida se obtienen de bases de datos de SimaPro-Ecoinvent, y algunos datos se estimaron con la metodología RSB y los métodos ART. La EICV corrió a cargo del software SimaPro y la metodología IMPACT 2002+. El ACV ha sido objeto de un enorme interés por parte de la comunidad científica para buscar redoblar esfuerzos en temas de sostenibilidad, especialmente en la producción de azúcar de caña. Esta metodología apoya el proceso de toma de decisiones para enfrentar este problema, actualmente reconocido como uno de los principales propulsores de los problemas ambientales en todo el mundo.

En la segunda etapa, se desarrolla un SEAD en fertilización, el análisis del estado del arte en esta etapa advierte que el cultivo de la caña de azúcar requiere cantidades equilibradas de macronutrientes en la fertilización; sin embargo, cuando existe sobre-fertilización, los suelos se vuelven menos competentes para producir caña de azúcar (impacto de los rendimientos de la caña de azúcar) y aumenta la carga ambiental en los sistemas agrícolas (degradación del suelo). En este trabajo de investigación se propone un SEAD que ayude a los agrónomos, agricultores a estimar las tasas correctas de fertilizantes. El sistema incluye el conocimiento y

la experiencia de expertos, además de parámetros extraídos de los análisis del suelo. Esta etapa también incluye el análisis con la metodología de superficie de respuesta, con este análisis los agricultores pueden aumentar los rendimientos de caña de azúcar, minimizar la carga ambiental y reducir los costos de compra de fertilizantes. Los resultados más importantes de este estudio son las tasas de éxito y la identificación de las variables que tienen el mayor impacto en los modelos. Aunque el SEAD es eficiente, también tiene un porcentaje de error. Por lo tanto, queda abierto para corregir los posibles errores y, de esta manera mejorar en lo posible los resultados del estudio.

El ACV es una herramienta eficiente para evaluar impactos ambientales, sin embargo, su alcance se limita solo a la evaluación de estos impactos, dejando atrás la posibilidad de buscar soluciones para minimizar los impactos ambientales. Por este motivo, se propuso el desarrollo de un modelo matemático de optimización multiobjetivo con AGs. La propuesta metodológica de esta etapa del trabajo incluye una combinación de SMC, ACV y OMAG. El objetivo de este diseño metodológico comprende la minimización de los aspectos ambientales y de costos a través optimización de los recursos utilizados en este proceso de producción. La SMC apoyo en la obtención de los datos del ICV a través de la evaluación de la variabilidad e incertidumbre en el proceso de producción; además, también se llevó a cabo el análisis de sensibilidad que permitió identificar a aquellas variables que tienen mayor impacto en el modelo, permitiendo la búsqueda de estrategias que modifiquen a las variables de decisión para obtener mejoras en el rendimiento ambiental y económico. El diseño metodológico del OMAG genera un abanico de soluciones factibles que puedan apoyar en la minimización de impactos ambientales y los costos de las materias primas y la energía utilizada. Los resultados de esta etapa indican que un manejo eficiente de los recursos, los combustibles y la energía, se puede disminuir la huella ambiental y económica que está generando esta industria

La aportación de esta investigación es el diseño metodológico, que comprende el ACV, y a partir de los resultados obtenidos, se desarrolló un SEAD basado en lógica difusa para estimar las tasas adecuadas de fertilizantes; además, se incluyó la OMAG para hacer frente a las etapas de la cadena de suministro que mayor contribución tiene a los impactos ambientales generados por esta industria.

Evolución del estado del arte

El estado de arte de esta investigación se centra en dos tipos de análisis, el primero se enfoca a la revisión de la literatura de la aplicación de ACV en la producción del azúcar de caña, y el segundo análisis se centra en las técnicas de IA que apoyan el ACV para mejorar algunas de sus etapas o para darle continuidad a sus resultados (a través de la optimización de impactos).

Con respecto al ACV aplicado en la producción del azúcar de caña, es indiscutible que el mayor impacto ambiental se observa en la etapa agrícola (crecimiento y la cosecha de la caña de azúcar). La cogeneración de electricidad por combustión del bagazo genera beneficios ambientales, sin embargo, sigue dejando una huella ecológica; finalmente, el transporte y la fábrica son las etapas que tienen menor impacto significativo. En el análisis, ningún trabajo de investigación incluye técnicas de IA que mejoren sus etapas y que optimicen sus resultados. Solo se incluye análisis de incertidumbre con SMC para algunas etapas de la cadena de suministro.

La revisión de la literatura con respecto a las técnicas de IA que apoyan al ACV, demuestra que estas técnicas pueden mejorar algunas etapas del ACV, como en la generación del ICV o la evaluación y la interpretación de los impactos ambientales. Además, la técnica de los AG's puede minimizar a través de la OMAG los impactos ambientales estimados por el ACV. Tradicionalmente el ACV se utiliza ampliamente en la producción de azúcar de caña, sin embargo, el alcance de esta metodología no aborda la minimización de los impactos ambientales, siendo evidente un área de oportunidad muy interesante. Los SEAD son útiles en la evaluación de impactos ambientales, sin embargo, también podrían ser útiles para enfrentar áreas de oportunidad donde la toma de decisiones se realiza aun de forma subjetiva o con demasiada incertidumbre (por ejemplo, la etapa agrícola).

Aportación del estudio al estado del arte

La aportación al conocimiento de esta investigación se establece en dos etapas principales:

1. El desarrollo de un modelo difuso que estima las tasas de fertilizantes NPK. La arquitectura incluye dos submodelos que engloban aspectos edáficos y nutricionales del suelo. Estos modelos son más eficientes en su arquitectura porque las funciones de

membresía son diseñadas con el apoyo de IC. El objetivo de este modelo difuso es estimar con mayor precisión las tasas de fertilizantes. Actualmente, estas tasas se estiman incorrectamente, lo que está provocando un grave daño al medio ambiente.

2. Un diseño metodológico que utiliza ACV, SMC y OMAG. Este diseño consiste en crear un modelo de SMC que estima los datos de entrada del ICV, posteriormente estos datos (convertidos a datos puntuales) se integran al inventario para evaluar los impactos, y después interpretar sus impactos, más adelante se crea un modelo matemático con funciones objetivo y sujeto a diferentes variables de decisión y restricciones, para que sea optimizado con AG's; finalmente, el resultado es la entrega de un modelo optimizado que minimiza los impactos ambientales de la cadena de suministro del azúcar de caña.

Aportación al desarrollo tecnológico

La aportación al desarrollo tecnológico de esta investigación se establece en dos etapas principales:

1. Desarrollo de un SEAD en el software LABVIEW. Este sistema será registrado como desarrollo tecnológico ante INDAUTOR para obtener los derechos de autor. Este desarrollo será entregado al gerente de campo y los supervisores para que pueda ser utilizado en el ingenio San Pedro S.A de C.V.
2. Desarrollo de un sistema que optimice los impactos ambientales y los costos. Este sistema será registrado ante INDAUTOR para obtener los derechos de autor. El sistema incluye una evaluación de impactos ambientales, un modelo de SMC y el uso del software Multigen como herramienta de optimización multiobjetivo.

Productividad**Tabla 6.1** Productividad de este trabajo de investigación

Estatus	Tipo	Titulo
Publicado	Congreso	Multi-criteria optimization of environmental impacts, resources use and human health of sugar cane life cycle assessment. MICAI 2015 - 14th Mexican International Conference on Artificial Intelligence. October 25th to 31st, 2015, Cuernavaca, Morelos, México.
	Artículo JCR	Life cycle assessment of cane sugar production: The environmental contribution to human health, climate change, ecosystem quality and resources in México Factor de impacto: 1.561 Revista: Journal of Environmental Science and Health, Part A Editorial: Taylor & francis)
Por enviar	Artículo JCR	Decision support system for NPK fertilization: a solution method for the estimated impacts in the life cycle assessment of sugarcane agriculture Revista: Agricultural systems Editorial: Elsevier Factor de impacto: 3.004
	Artículo JCR	A literature review of life cycle assessment of sugarcane and artificial intelligence techniques: an integrated approach to improving the sugarcane production. Revista: Computers and electronics in agriculture Editorial: Elsevier Factor de impacto: 2.427
En redacción	Artículo JCR	Multi-objective optimization of environmental impacts of the life cycle assessment of sugarcane

Tabla 6.2 Estancias empresariales e institucionales.

Lugar de estancia	Empresa/Institución	Fecha	Actividades
Lerdo de Tejada, Ver.	Ingenio San Pedro	29 de Jun -3 Jul 2015	Presentación con los interesados. Conocimiento del sistema.
Lerdo de Tejada, Ver.	Excelencia Cañera	28-30 de Sept 2015	Objetivo y alcance. Entrevista y cuestionarios ICV.
Lerdo de Tejada, Ver.	Ingenio San Pedro	31 de Sept-3de Oct 2015	Objetivo y alcance. Entrevista y cuestionarios ICV
Lerdo de Tejada, Ver.	Ingenio San Pedro	21-23 Mar-2016	Entrevistas y cuestionarios ICV.
Lerdo de Tejada, Ver.	Excelencia Cañera	24 y 25 de mar-2016	Entrevistas y cuestionarios ICV.
Lerdo de Tejada, Ver.	Ingenio San Pedro	9 -14 de abr-2017	Resultados parciales. Revisión de áreas de oportunidad.
Lerdo de Tejada, Ver.	Ingenio San Pedro	18-22 de dic-2017	Desarrollo del SEAD
	Universidad		Revisión del ICV
Mérida, Yucatán	Autónoma de Yucatán	3 de Oct-13 de Nov-2016	Capacitación en uso software SimaPro.
Mérida, Yucatán	Universidad Autónoma de Yucatán	30 de Sep-6 de Dic 2018	Desarrollo de optimización multicriterio.

Referencias

- Aarthi, R., & Sivakumar, D. (2017). Expert system for soil macronutrient recommendation. *International Journal of Innovative Works in Engineering and Technology*, 3, 209–215.
- Abd Razak, M., Abdul-Rahman, S., Mutalib, S., & Abd Aziz, Z. (2017). Nitrogen fertilizer recommender for paddy fields. In *Soft computing in data science* (p. 323). Singapore: Springer. https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-7242-0_20
- Aguilar-Rivera, N., Rodríguez L., D. A., Enríquez R., V., Castillo M., A., & Herrera S., A. (2012). The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends. *Sugar Tech*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0151-3>
- Alexander, B., Barton, G., Petrie, J., & Romagnoli, J. (2000). Process synthesis and optimisation tools for environmental design: methodology and structure. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2–7), 1195–1200. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00356-2](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00356-2)
- American National Standards Institute, I. (2006). ANSI/ISO 14040-1997 Environmental management: Life Cycle Assessment-Principles and framework. In *London: British Standards Institution* (pp. 1–16). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Andrés, J. J. L. (2015). *Optimización multi-criterio de los impactos ambientales, económicos y de salud del ciclo de vida en una planta procesadora de aves, a través de la norma ISO 14040 y técnicas de inteligencia artificial*. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Ashraf, A., Akram, M., & Sarwar, M. (2014a). Fuzzy decision support system for fertilizer. *Neural Comput & Applic*, 25(6), 1495–1505. <https://doi.org/10.1007/s00521-014-1639-4>
- Ashraf, A., Akram, M., & Sarwar, M. (2014b). Type-II Fuzzy decision support system for fertilizer. *The Scientific World Journal*, 2014, 9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2014/695815>
- Assimakopoulos, J. H., Kalivas, D. P., & Kollias, V. J. (2003). A GIS-based fuzzy classification for mapping the agricultural soils for N-fertilizers use. *The Science of the Total Environment*, 309, 19–33. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00055-X)
- Azapagic, A., & Clift, R. (1999). The application of life cycle assessment to process optimisation, 23, 1509–1526.
- Barradas, J. M. M., Dida, B., Matula, S., & Dolezal, F. (2018). A model to formulate nutritive
-

-
- solutions for fertigation with customized electrical conductivity and nutrient ratios. *Irrigation Science*, 36(3), 133–142. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0569-9>
- Benetto, E., Dujet, C., & Rousseaux, P. (2008). Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1461–1467. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.04.008>
- Björklund, A. E. (2002). Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *Int J LCA*, 7(2), 64–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02978849>
- Black, M. J., Whittaker, C., Hosseini, S. A., Diaz-chavez, R., Woods, J., & Murphy, R. J. (2011). Life cycle assessment and sustainability methodologies for assessing industrial crops, processes and end products. *Industrial Crops and Products*, 34, 1332–1339. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.002>
- Botha, T., & von Blottnitz, H. (2006). A comparison of the environmental benefits of bagasse-derived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. *Energy Policy*, 34, 2654–2661. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.12.017>
- Chauhan, M. K., Chaudhary, S. V., & Kumar, S. S. (2011). Life cycle assessment of sugar industry: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15, 3445–3453. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.033>
- Cheesman, O. D. (2004). *Environmental impacts of sugar production-The cultivation and processing of sugarcane and sugar beet*. Wallingford, UK: CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851999814.0000>
- Chen, S. H., Jakeman, A. J., & Norton, J. P. (2008). Artificial intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78, 379–400. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.01.028>
- CONADESUCA. (2015a). *Mecanismos de transporte de la caña de azúcar*. Ciudad de México, México. Retrieved from www.conadesuca.gob.mx
- CONADESUCA. (2015b). *Nutricion del cultivo de caña de azucar y uso eficiente de fertilizantes*. Mexico. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114366/Boletin_Tecnico_Informativo_Octubre_2015.pdf
- CONADESUCA. (2016a). *Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, Zafras 2006-2007/2015-2016 información de los ingenios*. Ciudad de México,
-

-
- México. Retrieved from <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico-zafras-2006-2007-2015-2016?idiom=es>
- CONADESUCA. (2016b). *Reducción del consumo de petróleo y generación de energía eléctrica en los ingenios*. Ciudad de México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114365/Boletin_Tecnico_Informativo_Enero_2016.pdf
- CONADESUCA. (2016c). *Variedades con mejores rendimientos de las zonas cañeras en México*. Mexico D.F. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114367/Nota_Informativa_Febrero_2016_Variedades_con_Mejores_Rendimientos_de_las_Zonas_Ca_eras_en_M_xico.pdf
- Contreras, A. M., Rosa, E., Pérez, M., Van Langenhove, H., & Dewulf, J. (2009). Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.12.001>
- Contreras, J. O. R. (2015). *Desarrollo de una red de valor con base a la gestión de bioenergía, para determinar estrategias de negocios*. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Coombs, J. (1984). Sugar-cane as an energy Crop. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 1(1), 311–346. <https://doi.org/10.1080/02648725.1984.10647789>
- Davis, A. M., Thorburn, P. J., Lewis, S. E., Bainbridge, Z. T., Attard, S. J., Milla, R., & Brodie, J. E. (2013). Environmental impacts of irrigated sugarcane production: Herbicide run-off dynamics from farms and associated drainage systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 180, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.019>
- de la Torre, M. L. De, Grande, J. A., Aroba, J., & Andujar, J. M. (2005). Optimization of fertirrigation efficiency in strawberry crops by application of fuzzy logic techniques. *J Environ Monit*, 11, 1085–1092. <https://doi.org/10.1039/b508502k>
- Dengel, A. (2013). Special issue on artificial intelligence in agriculture. *Künstl Intell*, 27, 309–311. <https://doi.org/10.1007/s13218-013-0275-y>
- Díaz, J. A., & Pérez, I. G. (2000). Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. In *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference* (pp. 1114–
-

-
- 1117). Orlando, FL, USA, USA. <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899073>
- Dreyer, L. C., Niemann, A. L., & Hauschild, M. Z. (2003). Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. *Int J Life Cycle Assess*, 8, 191–200.
- Dufo-lópez, R., Bernal-agustín, J. L., Yusta-loyo, J. M., Domínguez-navarro, J. A., Ramírez-rosado, I. J., Lujano, J., & Aso, I. (2011). Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV – wind – diesel systems with batteries storage, 88, 4033–4041. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019>
- Ecoinvent. (2018). The ecoinvent database. Retrieved from <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-35/ecoinvent-35.html>
- Ensinas, A. V., Nebra, S. A., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2007). Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management*, 48, 2978–2987. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.038>
- FAOSTAT. (2018). Crops, visualize data. Retrieved May 8, 2018, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>
- Filimonau, V. (2016). *Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Analysis in Tourism* (1st ed.). Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26224-6>
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R. B. H., Christiansen, K., & Klüppel, H. (2006). Commentaries The New International Standards for Life Cycle Assessment : ISO 14040 and ISO 14044, 11(2), 80–85.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fukushima, Y., & Chen, S.-P. (2009). A decision support tool for modifications in crop cultivation method based on life cycle assessment: a case study on greenhouse gas emission reduction in Taiwanese sugarcane cultivation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(7), 639–655. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0100-x>
- Gallardo, J. R. P. (2013). *Ecodesign of large-scale photovoltaic (PV) systems with multi-objective optimization and Life-Cycle Assessment (LCA)*. Institut National Polytechnique
-

-
- de Toulouse (INP Toulouse). Retrieved from http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002416/01/perez_gallardo_partie_1_sur_2.pdf
- García, C. A., Fuentes, A., Hennecke, A., Riegelhaupt, E., Manzini, F., & Masera, O. (2011). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy*, 88, 2088–2097. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.072>
- Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). *Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach*. London: Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7>
- Gil, M. P., Moya, A. M. C., & Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.006>
- Godfray, J., Beddington, J., Crute, I., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... Toulmin, C. (2010). Food Security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–819. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Gomathi, R., Gururaja Rao, P., Chandran, K., & Selvi, A. (2014). Adaptive responses of sugarcane to waterlogging stress: An over view. *Sugar Tech*, 17(4), 325–338. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0319-0>
- González, B., Adenso-Díaz, B., & Gonzalez-Torre, P. L. (2002). A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 61–79.
- Güereca, L. P., Agell, N., Gassó, S., & Baldasano, J. M. (2007). LCA Methodology Fuzzy Approach to Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Life Cycle Assesment*, 12(7), 488–496.
- Güereca, Sosa, R. O., Gilbert, H. E., & Reynaga, N. S. (2015). Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 311–317. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>
- Guinée, J., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Bounamici, R., ... Rydberg, T. (2011). Life Cycle Assessment : Past, present, and future. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 90–96.
- He, J., Wang, J., He, D., Dong, J., & Wang, Y. (2011). The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system. *Mathematical and Computer*
-

Modelling, 54(3–4), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.050>

- Herrmann, I. T., Hauschild, M. Z., Sohn, M. D., & McKone, T. E. (2014). Confronting uncertainty in life cycle assessment used for decision support. *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 366–379. <https://doi.org/10.1111/jiec.12085>
- Humbert, S., Schryver, A. De, Bengoa, X., Margni, M., & Jolliet, O. (2012). *IMPACT 2002+: User guide*. Switzerland. Retrieved from https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf
- International Organization for Standardization. (2000). ISO 14043 Environmental management, Life cycle assessment, Life cycle interpretation. In *ISO 2000* (First edit, Vol. 2000, p. 26). Switzerland: ISO 2000. <https://doi.org/10.5594/J09750>
- ISO. ISO 14043 Environmental Management–Life cycle assessment–Life Cycle Interpretation, International Organization for Standardization (ISO) § (2000). Geneva, Switzerland.
- ISO (the International Organization for Standardization). (1998). *ISO 14041 - Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis* (Vol. 1998).
- ISO 14049:2000 (the International Organization for Standardization). (2000). *ISO 14049:2000- Environmental management: Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis. Technical Report*.
- Jacquemin, L., Pontalier, P. Y., & Sablayrolles, C. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *Int J Life Cycle Assess*, 17, 1028–1041. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0432-9>
- Jadhav, K., Yelapure, J., & Babar, M. (2012). Fuzzy prolog rules in knowledge based diagnosis of nutrient deficiency in sugarcane crop. *International Journal of Computing and Corporate Research*, 2(1), 1–10.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002 +: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int J LCA*, 8(6), 324–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Jolliet, O., Müller-wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., ... Stewart, M. (2004). The LCIA Midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle
-

-
- initiative. *Int J Life Cycle Assess*, 9(6), 394–404.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02979083>
- Khaire, S., Padole, P., Bore, R., Koli, R., & Kulkarni, D. (2017). Review on urea prediction system using fuzzy logic. *International Journal of General Science and Engineering Research*, 3(2), 54–56.
- Khoshnevisan, B., Bolandnazar, E., Shamshirband, S., Shariati, H. M., Anuar, N. B., & Kiah, M. (2015). Decreasing environmental impacts of cropping systems using life cycle assessment (LCA) and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 86, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.062>
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Mousazadeh, H., & Clark, S. (2013). Environmental impact assessment of tomato and cucumber cultivation in greenhouses using life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Cleaner Production*, 73, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.057>
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Mousazadeh, H., & Sefeedpari, P. (2013). Prognostication of environmental indices in potato production using artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 52, 402–409.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.028>
- Khoshnevisan, B., Rajaeifar, M. A., Clark, S., Shamahirband, S., Anuar, N. B., Liyana, N., ... Gani, A. (2014). Evaluation of traditional and consolidated rice farms in Guilan Province , Iran , using life cycle assessment and fuzzy modeling. *Science of the Total Environment*, 481, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.052>
- Kiatkittipong, W., Wongsuchoto, P., & Pavasant, P. (2009). Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Management*, 29, 1628–1633.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.006>
- Komly, C., Azzaro-pantel, C., Hubert, A., Pibouleau, L., & Archambault, V. (2012). Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 66–81. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.08.008>
- Kostin, A., Guillen-Gozálbz, G., Mele, F.D., Jimenez, L., 2012. Objective reduction in multi-criteria optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains. In: 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (Comput.- Aided Chem
-

Eng.), 30, pp. 1e5.

- Kostin, A., Mele, F., Guillen-Gonzálbez, G., 2011. Multi-objective optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains considering different LCA metrics simultaneously. In: 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering (Comput. Aided Chem. Eng.), 29, pp. 1276e1280.
- Koza, J. (1992). *Genetic programming on the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge, MA: MIT press.
- Kramer, O. (2017). *Genetic algorithm essentials*. Germany: Springer.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5>
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lestari, R. L., Bohez, E. L. J., Ciptomulyono, U., & Perret, S. R. (2013). Life cycle assessment of sugar from sugarcane: A case study of Indonesia. In *Asian academic society international conference (ASEAN)* (pp. 17–20).
- Li, Y., & Solomon, S. (2003). Ethephon: A versatile growth regulator for sugar cane industry. *Sugar Tech*, 5(4), 213–223.
- Liao, S. (2004). Expert system methodologies and applications — a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems With Applications*, 28(1), 93–103.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.08.003>
- Lopes, S. DA, Delai, I., Montes, D. M., & Ometto, R. A. (2014). Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 532–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>
- López-Andrés, J. J., Aguilar-Lasserre, A. A., Morales-Mendoza, L. F., Azzaro-Pantel, C., Pérez-Gallardo, J. R., & Rico-Contreras, J. O. (2018). Environmental impact assessment of chicken meat production via an integrated methodology based on LCA, simulation and genetic algorithms. *Journal of cleaner production*, 174, 477-491
- Martín del Brío, B., & Molina, A. S. (2001). *Redes neuronales y sistemas difusos* (2a ed.). Alfaomega Ra-Ma.
- Martinsanz, P. G., & Peñas, S. M. (2005). *Inteligencia Artificial e ingeniería del conocimiento* (1^a). Madrid, España: Alfaomega Ra-Ma.
- Mashoko, L., Mbohwa, C., & Thomas, V. M. (2010). LCA of the South African sugar
-

-
- industry. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(6), 793–807.
<https://doi.org/10.1080/09640568.2010.488120>
- Mashoko, L., Mbohwa, C., & Thomas, V. M. (2013). Life cycle inventory of electricity cogeneration from bagasse in the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 39, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.034>
- Melamu, R., & Blottnitz, H. Von. (2011). 2nd Generation biofuels a sure bet? A life cycle assessment of how things could go wrong. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.021>
- Mellit, A., Kalogirou, S. A., Hontoria, L., & Shaari, S. (2009). Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 406–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.006>
- Mendoza, L. F. M. (2013). *Eco-design of chemical processes: an integrated approach coupling process modelling, Life Cycle Assessment and multi-objective optimization*. Institut National Polytechnique de Toulouse. Retrieved from <http://oatao.univ-toulouse.fr/11470/>
- Miller, S. A., Landis, A. E., & Theis, T. L. (2006). Use of Monte Carlo Analysis to characterize nitrogen fluxes in agroecosystems. *Environ Sci Technol*, 40(7), 2324–2332. <https://doi.org/10.1021/es0518878>
- Mirjalili, S. (2019). *Evolutionary algorithms and neural networks Theory and applications*. Berlin Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1>
- Morales-Mendoza, L. F. (2013). *Eco-design of chemical processes: an integrated approach coupling process modelling, Life Cycle Assessment and multi-objective optimization*". Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- Morales Mendoza, L.F., Boix, M., Azzaro-Pantel, C., Montastruc, L., Domenech, S., 2014. Biodiesel production from waste vegetable oils: combining process modelling, multiobjective optimization and life cycle assessment (LCA). In: 24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (Comput. Aided Chem. Eng.), 33, pp. 235e240.
- More, V. B., Kashid, D. N., & Jadhav, B. T. (2016). Development of fuzzy inference system for nitrogen requirement in grape vineyard. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 6(2), 18–25.
-

-
- Nemecek, T., & Schnetzer, J. (2012). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*. Zurich, Switzerland.
- Nguyen, T. L. T., & Gheewala, S. H. (2008). Life cycle assessment of fuel ethanol from cane molasses in Thailand, 301–311. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0011-2>
- Nirosha, S., & Srinivasan, P. R. (2015). Application of soft computing algorithm for the fertigation of horticulture crops. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 3(2), 854–858.
- Novák, V. (2006). Which logic is the real fuzzy logic? *Fuzzy Sets and Systems*, 157(5), 635–641. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.10.010>
- Ometto, A. R., & Hauschild, M. Z. (2009). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil, 236–247. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0065-9>
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Owens, J. W. (1997). Life-Cycle Assessment: Constraints on moving from inventory to impact assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 1(1), 37–49. <https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.1.37>
- Ozbilen, A., Aydin, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Life cycle assessment of nuclear-based hydrogen production via a copper e chlorine cycle : A neural network approach, 8, 0–8.
- Pachón, Á., Llano, G., Munera, L., Barrios, C., Lubo, C., Borrero, J., & Calderon, G. (2017). Fertilization strategies in sugar cane crops in the Cauca Valley: A Review. In *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change. AACC'17* (Vol. 687, pp. 70–81). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5>
- Papadopoulos, A., Kalivas, D., & Hatzichristos, T. (2011). Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory. *Computers and Electronics in Agriculture*, 78(2), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.06.007>
- Park, J., & Seo, K. (2006). A knowledge-based approximate life cycle assessment system for evaluating environmental impacts of product design alternatives in a collaborative design environment. *Advanced Engineering Informatics*, 20, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.09.003>
-

-
- Pathak, H., Mohanty, S., Jain, N., & Bhatia, A. (2010). Nitrogen, phosphorus, and potassium budgets in Indian agriculture. *Nutr Cycl Agroecosyst*, *86*, 287–299.
<https://doi.org/10.1007/s10705-009-9292-5>
- Paturau, J. (1989). *By-products of the cane sugar industry. An introduction to their industrial utilization*. (Elsevier, Ed.) (3rd ed.). Amsterdam.
- Perez-gallardo, J. R., Azzaro-pantel, C., Astier, S., Domenech, S., & Aguilar-lasserre, A. (2014). Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems. *Renewable Energy*, *64*, 82–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.027>
- Prabakaran, G., Vaithiyathan, D., & Ganesan, M. (2018). Fuzzy decision support system for improving the crop productivity and efficient use of fertilizers. *Computers and Electronics in Agriculture*, *150*, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
- PRÉ CONSULTANTS B.V. (2018). What is SimaPro? About SimaPro Retrieved from. Retrieved from <https://simapro.com/about/>
- Quintana Monasterio, A. O. (2012). *Guía práctica de trámites y permisos para proyectos de cogeneración de energía eléctrica en México*. México DF. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200257/cogeneracion.pdf>
- Ramjeawon, T. (2004). Life cycle assessment of cane-sugar on the island of Mauritius. *Int. J. Life. Cycle. Assess.*, *9*(4), 254–260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02978601>
- Ramjeawon, T. (2008). Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, *16*, 1727–1734.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.11.001>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. (2004). Life cycle assessment Part 1 : Framework , goal and scope definition , inventory analysis , and applications. *Environment International*, *30*, 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Renouf, M. ., Wegener, M. K., & Pagan, R. J. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(9), 927–937. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0226-x>
- Renouf, M. A., Pagan, R. J., & Wegener, M. K. (2011). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *Int. J. Life Cycle Assess.*, *16*(2), 125–137. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0233-y>
-

-
- Renouf, M. A., & Wegener, M. K. (2007). Environmental life cycle assessment (LCA) of sugarcane production and processing in Australia. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 385–400. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Reznik, L. (1997). *Fuzzy controllers* (First). Melbourne, Australia: Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3429-8.X5002-7>
- Ross, T. J. (2004). *Fuzzy logic with engineering applications* (Second). John Wiley & Sons Ltd.
- Roundtable on Sustainable Biofuels. RSB GHG calculation methodology, Pub. L. No. RSB-STD-01-003-01, 2.1 1 (2012). Geneva, Switzerland.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>
- Roy, R., Finck, A., Blair, G., & Tandon, H. (2006). *Plant nutrition for food security-A guide for integrated nutrient management*. Rome, Italy: Food and agriculture organization of the united nations.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (1995). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice-Hall. New Jersey. <https://doi.org/10.1007/s11894-010-0163-7>
- SAGARPA. (2009). *PRONAC Digitalización del campo cañero en México para alcanzar la agricultura de precisión de la caña de azúcar*. Ciudad de México, México: SAGARPA. Retrieved from <http://docplayer.es/65444920-Ingenio-el-modelo-s-a.html>
- Seabra, J. E., Macedo, I. C., Chum, H., Faroni, C. E., & Sarto, C. A. (2011). Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, 5(5), 519–532. <https://doi.org/10.1002/bbb.289>
- Singh, H., & Sharma, N. (2014). Optimization of fertilizer rates for wheat crop using fuzzy expert system. *International Journal of Computer Applications*, 100(1), 36–40. <https://doi.org/10.5120/17491-8009>
- Sivanandam, S., & Deepa, S. (2008). *Introduction to genetic algorithms*. Berlin Heidelberg: Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-73190-0>
- Skone, T. J. (2000). What is life cycle interpretation? *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 19(2), 92–100.
- Sonnemann, G., Francisc, C., & Schuhmacher, M. (2003). *Integrated life-cycle and risk*
-

assessment for industrial processes. (C. Press, Ed.). USA: Lewis publishers.

- Thiel, C., Seppel, R., Müller-Pietralla, W., & Richter, O. (1999). LCA Methodology An Integrated Approach for Environmental Assessments. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(3), 151–160.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In M. E. S. D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods* (2nd Editio, pp. 475–490). Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.
<https://doi.org/doi:10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Tian-Ming, S., Yang-Rui, L., Guang-Po, W., Ze-Pu, J., Qing, L., & Shu-Biao, Z. (2012). Macronutrients absorption and surface runoff losses under different fertilizer treatments in sugarcane field. *Sugar Tech*, 14(3), 255–260. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0160-2>
- Tremblay, N., Bouroubi, M. Y., Panneton, B., Guillaume, S., Vigneault, P., & Bélec, C. (2010). Development and validation of fuzzy logic inference to determine optimum rates of N for corn on the basis of field and crop features. *Precision Agric*, 11, 621–635.
<https://doi.org/10.1007/s11119-010-9188-z>
- Tukker, A. (2000). Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 20, 435–456. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00045-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00045-1)
- Van Der Laan, M., Jumman, A., Tweddle, P., Wettergreen, T., & Van Antwerpen, R. (2012). Application of a life cycle assessment approach to quantify the environmental benefits of improved irrigation scheduling in sugarcane. In *85th Annual Congress of the South African Sugar Technologists' Association* (Vol. 85, pp. 174–179).
- Vigon, B., Tolle, D., Cornaby, B., Latham, H., Harrison, C., Boguski, T., ... U.S.E.P.A. (1993). *Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles* (1st ed.). USA: Lewis publishers.
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobul'ská, L., & Ferreira, A. S. (2017). Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological Indicators*, 74, 182–190.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>
-

-
- Wang, W., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *40*, 1512–1525.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.017>
- Watson, C. A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L. R., & Rayns, F. W. (2002). Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management*, *18*, 239–247.
<https://doi.org/10.1079/SUM2002131>
- Weckenmann, A., & Schwan, A. (2001). Environmental Life Cycle Assessment with support of fuzzy-sets. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *6*(1), 13–18.
<https://doi.org/10.1007/BF02977589>
- Wernet, G., Hellweg, S., Fischer, U., Papadokonstantakis, S., & Hungerbühler, K. (2008). Molecular-structure-based models of chemical inventories using neural networks. *Environ Sci Technol*, *42*(17), 6717–6722.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es7022362>
- Yang-Rui, L., & Li-Tao, Y. (2015). Sugarcane agriculture and sugar industry in China. *Sugar Tech*, *17*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0342-1>
- Yang-Rui, L., Xiu-Peng, S., Jian-Ming, W., Chang-Ning, L., Qiang, L., Xi-Hui, L., ... Li-Tao, Y. (2016). Sugar industry and improved sugarcane farming technologies in China. *Sugar Tech*, *18*(6), 603–611. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0480-8>
- Yue, Z. (2011). A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS. *Applied Mathematical Modelling*, *35*(4), 1926–1936.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.001>

Anexo

Anexo 1.1

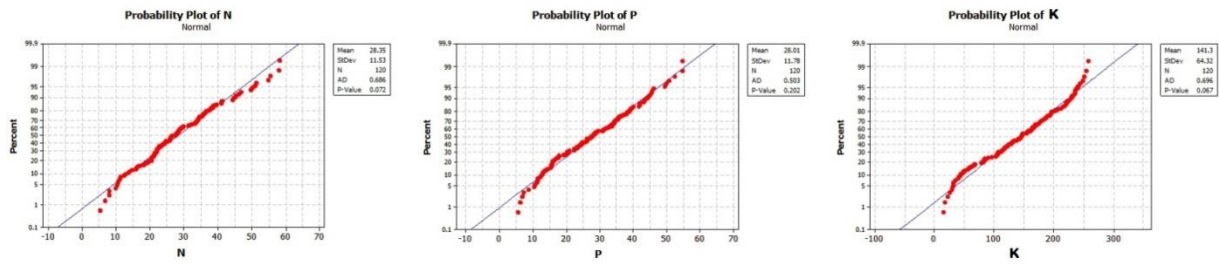


Figura 1-a. Distribuciones de probabilidad de NPK

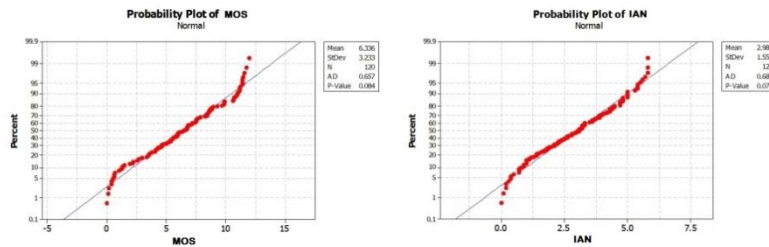


Figura 1-b. Distribuciones de probabilidad de MOS e IAN

Tabla 1.a Parámetros de las variables y estimación de los IC.

IC del modelo CED-M										
Variable MOS										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LI	LIU	LSU	LS
Bajo	21	1.3	0.95	0.05	2.086		0	0.9	1.7	3.4
Normal	40	5	0.95	0.05		1.645	3	4.8	5.3	7
Alto	59	9	1.7	0.05		1.645	6.5	8.7	9.4	12
Variable IAN										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LI	LIU	LSU	LS
Bajo	18	0.6	0.34	0.05	2.11		0	0.4	0.8	1
Alto	102	3.4	1.28	0.05		1.645	0.8	3.2	3.6	6

Tabla 1.b Parámetros de las variables y estimación de los IC.

IC del modelo NPK-M										
Variable P										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LL	ULL	UUL	UL
Bajo	10	9	2.34	0.05	2.262		0	7.4	10.7	12
Suficiente	59	21.4	5.31	0.05		1.645	10	20.2	22.5	30
Alto	51	39.4	6.34	0.05		1.645	25	38	40.9	60
Variable K										
Etiqueta lingüística	n	\bar{x}	σ	α	$t\alpha, n-1$	$Z\alpha$	LL	ULL	UUL	UL
Bajo	23	44	17.5	0.05	2.074		10	36.6	51.4	80
Suficiente	46	122.8	22.16	0.05		1.645	70	117.4	128.1	160
Alto	51	202	29.07	0.05		1.645	150	195.3	208.7	210

Tabla 1c. Soluciones factibles con el método TOPSIS

Numero de solución	Costos	Salud humana	Calidad del ecosistema	Cambio climático	Recursos
1	189831331.98	0.292223908	0.087485269	0.115703267	0.052164443
4	189510762.49	0.292092802	0.087486444	0.115595167	0.051974763
5	189717050.71	0.292133213	0.087487124	0.115626931	0.052017265
6	189662378.94	0.292270337	0.087488986	0.115735260	0.052169199
13	189793871.13	0.292331392	0.087494058	0.115779894	0.052162303
15	189931879.62	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711
17	189931879.62	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711
18	189820850.38	0.292284970	0.087490035	0.115743628	0.052179503
19	189931879.62	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711
21	189931879.62	0.292283845	0.087489955	0.115742985	0.052178711
26	189900975.13	0.292338351	0.087494529	0.115783485	0.052169199
29	189833040.49	0.292286096	0.087490116	0.115744272	0.052180296
34	189839432.85	0.292332383	0.087491267	0.115780275	0.052223009

Acrónimos

ACV	Análisis de ciclo de vida
AGs	Algoritmos genéticos
ANFIS	Sistema de inferencia neuro-difusa
ART	Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station
CE	Conductividad eléctrica
CED-M	Modelo de condición edáfica
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CG	Calentamiento global
CONADESUCA	Comisión Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
CTS	Clase textural del suelo
DC	Datos en campo
DEA	Demanda de energía acumulada
DH	Datos históricos
EICV	Evaluación de impactos del ciclo de vida
ENR	Uso de energía no renovable
ERA	evaluación de riesgo ambiental
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FM	Funciones de membresía
FO	Funciones objetivo
FV	Celdas fotovoltaicas
GC	Granja consolidada
GE1	Grupo de expertos número 1
GE2	Grupo de expertos número 2
GEI	Gases de efecto invernadero
GT	Granja tradicional
IA	Inteligencia Artificial
IAN	Índice de anegamiento
IC	Intervalos de confianza
ICV	Inventario de ciclo de vida
IMPACT 2002+	IMPact Assessment of Chemical Toxics
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
K	Potasio
LD	Lógica difusa
LSPEE	Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica
MoE	Etanol a base de melaza
OMAG	Optimización multicriterio con algoritmos genéticos
MOS	Materia orgánica del suelo
N	Nitrógeno
NPK-M	Modelo de fertilización NPK
P	Fosforo
PA	Potencial de acidificación
PE	Potencial de eutrofización
PEcoT	Potencial de ecotoxicidad terrestre
PET	Tereftalato de polietileno
PFO	Potencial de formación de oxidante
pH	Potencial de hidrogeno
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PTH	Potencial de toxicidad humana

Acrónimos

REC	Rendimiento esperado de caña
RI	Respiración inorgánica
RNAs	Redes neuronales artificiales
RSB	Roundtable on sustainable biofuels
SEDs	Sistemas expertos difusos
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEs	Sistemas expertos
SMC	Simulación Monte Carlo
UF	Unidad funcional

Intervalos de confianza para muestras grandes, varianza conocida

Supóngase que se tiene una población con media desconocida μ_x y desviación estándar conocida σ_x . De esta población se toma una muestra aleatoria X_1, X_2, \dots, X_n de tamaño n . La media muestral \bar{X} es un estimador puntual razonable de la media desconocida μ_x . Considerar la distribución de muestreo de la media muestral \bar{X} , el cual se define a continuación en la siguiente forma:

“Si \bar{X} es la media muestral de una muestra aleatoria de tamaño n de una población normal con desviación estándar conocida σ_x un intervalo de confianza para la media poblacional μ_x desconocida, del 100 $(1 - \alpha)$ por ciento está dado por”

Bilateral:

$$\left(\bar{X} - \left(Z_{\alpha/2} \right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + \left(Z_{\alpha/2} \right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad \text{Ec a1}$$

Donde $Z_{\alpha/2}$ es el punto de la distribución normal estándar que corresponde al porcentaje $\alpha/2$.

Unilateral inferior:

$$\left(\bar{X} - Z_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) < \mu \quad \text{Ec a2}$$

Unilateral superior:

$$\mu < \left(\bar{X} + Z_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad \text{Ec. a3}$$

Intervalos de confianza para muestras pequeñas, varianza desconocida

Cuando debe tomarse una muestra pequeña, la distribución normal puede no aplicarse. El teorema del límite central asegura normalidad en el proceso de muestreo sólo si la muestra es grande. Cuando se utiliza una muestra pequeña, puede ser necesaria una distribución alternativa, la **distribución t Student** (o simplemente la distribución t). Específicamente, la distribución t se utiliza cuando se cumplen las tres condiciones: (1) la muestra es pequeña, (2) σ es desconocida, y (3) la población es normal o casi normal. Si σ es conocida, la distribución Z se usa inclusive si la muestra es pequeña. Además, si no puede asumirse una población normal, se aumenta el tamaño de la muestra para utilizar la distribución Z y de no ser posible se debe confiar en las pruebas no paramétricas.

La distribución t Student fue desarrollada en 1908 por William S. Gosset (1876- 1937). Al igual que la distribución Z , la distribución t tiene una media de cero, es simétrica con respecto a la media y oscila entre $-\infty$ y $+\infty$. Sin embargo, mientras que la distribución Z tiene una varianza de $d = 1$, la varianza de la distribución t es mayor que 1. Por tanto, es más plana y más dispersa que la distribución Z . La varianza para la distribución t es (Allen W. Webster, 2000).

$$\sigma^2 = \frac{n-1}{n-3} \quad \text{Ec. a4}$$

Se debe recalcar que cuando se desea determinar un intervalo de confianza para estimar la media poblacional μ_x desconocida, tomando como base a la desviación estándar conocida σ_x , se utiliza el Teorema del límite central. Mientras que, cuando se toma como base a la desviación estándar desconocida S_x , se debe usar la distribución muestral de la variable aleatoria T . Sin embargo, el uso de la distribución t se basa en la premisa que la muestra se toma de una población con una distribución normal.

Mientras la distribución se aproxime a la forma de campana, los intervalos de confianza pueden calcularse cuando se desconoce la desviación estándar de la población σ_x , utilizando la distribución t y se puede esperar buenos resultados.

Con mucha frecuencia los especialistas en la estadística recomiendan que incluso cuando no se pueda suponer normalidad y se tenga una desviación estándar poblacional σ_x desconocida y $n > 30$, la desviación estándar muestral S podría reemplazar a la desviación estándar poblacional σ_x y se pueden utilizar los siguientes intervalos de confianza.

Bilateral:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec a5}$$

Unilateral inferior:

$$\bar{X} - \left(t_{\alpha, n-1} \right) \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu \quad \text{Ec. a6}$$

Unilateral superior:

$$\mu < \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. a7}$$

En general esto se conoce como “intervalo de confianza de muestra grande”. La justificación de esto, descansa únicamente en la suposición de que con una muestra tan grande como $n=30$, la desviación estándar muestral S se acercara mucho a la σ_x verdadera y entonces sigue siendo aplicable el teorema del límite central.

Glosario de términos

Categorías punto medio (Midpoint)

1. **Cancerígenos o carcinógenos:** Se refiere a sustancias que pueden provocar cáncer al exponerse a tejidos vivos. Un cancerígeno es un agente físico o químico capaz de producir una neoplasia. Ejemplos: benceno y asbesto.

-
2. **No-cancerígenos o no-carcinógenos:** Estas sustancias producen efectos diferentes al cáncer, como pueden ser síntomas neurotóxicos, alteraciones de la microcirculación periférica, alteraciones cutáneas del tipo de la esclerodermia, alteraciones óseas, alteraciones de hígado y bazo con alteraciones de la celularidad sanguínea asociadas, síntomas genotóxicos, entre otros, cuando existe una exposición prolongada.
 3. **Inorgánicos respirables:** Se refiere a efectos respiratorios derivados de sustancias inorgánicas. Se toma como referencia el tamaño de 2.5 micrómetros, pues partículas más grandes no pueden entrar al pulmón. Estas partículas pueden causar: tos, dificultad para respirar, agrava el asma, daño al pulmón (disminución de la función del pulmón y enfermedades respiratorias de por vida), muerte prematura en individuos con enfermedades existentes del corazón y del pulmón.
 4. **Radiación ionizante:** Se refiere al flujo de partículas o fotones con suficiente energía para producir ionizaciones en las moléculas que atraviesa. Esta radiación puede causar cáncer, quemaduras de piel, caída del cabello, náuseas e incluso la muerte. Estos síntomas dependerán de la cantidad de radiación recibida.
 5. **Daño a la capa de ozono:** Este indicador mide la degradación de la capa de ozono por la utilización (normalmente) de clorofluorocarbonos.
 6. **Orgánicos respirables:** Antes llamado oxidación fotoquímica. Puede provocar efectos sobre el sistema nervioso central. A elevadas concentraciones puede causar asfixia sin que la víctima se dé cuenta. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. Es causante del smog fotoquímico. El impacto final puede ser en 2 categorías de daño: salud humana y calidad del ecosistema. En el caso de la salud humana en ocasiones se denomina "efectos respiratorios de productos orgánicos" (Goedkoop & Spriensma, 2000). Para la calidad del ecosistema aún no se ha logrado cuantificar el impacto (en el crecimiento de las plantas).
 7. **Ecotoxicidad acuática:** El problema de este indicador es que algunas especies pueden concentrar esta contaminación en su organismo, lo que les causa la muerte y los hace no aptos para el consumo humano.
 8. **Ecotoxicidad terrestre:** Provoca el deterioro del suelo haciéndolo inutilizable para cualquier actividad agrícola o social.
 9. **Acidificación acuática:** Se define como el descenso en curso del pH de los océanos de la Tierra, causado por la absorción de dióxido de carbono antropogénico desde la atmósfera.
 10. **Eutrofización acuática:** La eutrofización se refiere al incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton, responsable del oxígeno en la tierra, por lo que este impacto se vuelve benéfico al medio ambiente. Lamentablemente aún no ha podido ser cuantificado su impacto en los endpoints.
 11. **Acidificación/nutrición terrestre:** La acidificación del suelo es el proceso por el cual el suelo absorbe cationes de hidrógeno, reduciendo su pH. La acidificación puede también ocurrir por emisiones de nitrógeno al aire, tanto que el nitrógeno finalmente se deposite en el suelo. No hay que olvidar la contribución de la lluvia ácida.
 12. **Ocupación del suelo:** Se refiere a la cantidad de m² de tierra ocupada normalmente para cultivos orgánicos, así como los efectos causados por pesticidas y fertilizantes.
 13. **Calentamiento global:** Se refiere a la cantidad de CO₂ equivalente emitido al aire, lo cual causa un efecto invernadero en el planeta, aumentando la temperatura y provocando desastres naturales. Se utilizan los potenciales de calentamiento atmosférico (PCA) para un horizonte temporal de 100 años.
-

-
14. **Energía no-renovable:** Se refiere al consumo de energías no-renovables, en términos de la energía primaria total extraída, se calculan utilizando los valores de calentamiento superior.
 15. **Extracción de minerales:** Es referente a los daños y perjuicios por la extracción de minerales desde la naturaleza (Andrés, 2015).

Diferentes tipos de unidades son usadas en IMPACT 2002+

A nivel punto medio:

Kg de sustancia s-eq (kg equivalente de una sustancia de referencia s) expresa la cantidad de una sustancia de referencia 's' que equivale al impacto del contaminante considerado dentro del estudio de categoría de punto medio (e.g., el potencial de calentamiento global del metano es 27.75 más alto que el del CO₂, por lo que su factor de conversión FC es 27.75 kg CO₂-eq) .

A nivel de daño (endpoint):

1. **DALY** (Disability-Adjusted Life Years): Son los años de vida ajustados por discapacidad. Caracteriza la severidad de la enfermedad, tomando en cuenta tanto la mortalidad (años de vida perdidos debido a la muerte prematura) como morbilidad (el tiempo de vida con calidad baja debido a una enfermedad, por ejemplo; hospitalizado). Por ejemplo: un producto que tenga un puntaje de 3 DALY con respecto a salud humana implica la pérdida de tres años de vida sobre la población total.
2. **PDF•m²•yr** (Potentially Disappeared Fraction of species over a certain amount of m² during a certain amount of year): Es la fracción de desaparición potencial de especies sobre una cierta cantidad de m² durante un año. Es la unidad para medir los impactos sobre los ecosistemas. La categoría PDF•m²•yr representa fracción de especies desaparecidas en 1 m² de superficie terrestre durante 1 año. Por ejemplo: un producto que tenga un puntaje de calidad de ecosistema de 0.2 PDF•m²•yr implica la pérdida del 20% de especies en 1 m² de superficie terrestre durante 1 año.
3. **MJ (Mega Joules):** Megajulios, Mide la cantidad de energía extraída o necesaria para extraer el recurso (Humbert et al., 2012).