

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

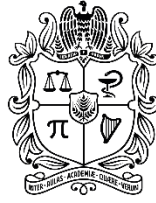
Modelado para la evaluación de Sostenibilidad en la Cadena de Suministro de Bioetanol.

Danny Waldir Ibarra Vega

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Departamento de
Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

Manizales, Colombia.

Octubre, 2017



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelado para la evaluación de Sostenibilidad en la Cadena de Suministro de Bioetanol.

Danny W. Ibarra Vega

Tesis Doctoral presentada como requisito obtener el título de:

Doctor en Ingeniería – Línea Automática

Director:

Gerard Olivar Tost PhD.

Co-director:

Johan Manuel Redondo PhD.

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Departamento de
Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
Manizales, Colombia.

Octubre, 2017

A mí amada familia quienes siempre están orgullosos de cada paso que doy, a mi padre y madre, quienes esperan con ansias ver a su hijo ser un doctor.

Agradecimientos.

A mi director de tesis Gerard por todo su apoyo y colaboración para la ejecución exitosa de este proyecto de investigación.

A mi amigo y codirector Johan Manuel Redondo, por su dedicación, tiempo, interés en las discusiones permanentes sobre la vida, el futuro, la motivación, Dinámica de Sistemas, el modelado y desde luego el tema de tesis.

A mi amigo Carlos Peña, por su presencia constante en la evolución del proceso hacia la tesis, sus constantes acompañamientos y motivaciones para culminar este peldaño.

A la comunidad Colombiana de Dinámica de Sistemas, ya que gracias a los eventos anuales y encuentros nacionales pude aprender y crecer cómo investigador.

A la Dirección de Investigación de la Universidad Sergio Arboleda, por su apoyo a través de la financiación para participación en numerosos congresos nacionales e internacionales.

A todas las personas que de una u otra manera me acompañaron durante este proceso y fueron de gran apoyo para continuar.

Resumen

La sostenibilidad es actualmente uno de los conceptos más importantes en investigación científica y programas gubernamentales de diferentes países (Nabavi et al., 2017). Esto aplica a todos los sectores productivos que están en expansión en las economías locales y globales. Uno de los sectores más significativos para la implementación y evaluación de la sostenibilidad es el sector de los biocombustibles por su constante crecimiento y dudas sobre impactos socio ambientales. Colombia, es el décimo país productor de bioetanol en el mundo y el tercero en América Latina, sin embargo, las implicaciones futuras de los aspectos sociales y ambientales de su producción aún no se encuentran demostradas y son ampliamente discutidas desde diferentes aristas.

En este documento de tesis doctoral, se logró establecer un modelo que representa la cadena de suministro de bioetanol en Colombia, con la vinculación de indicadores, que permitan la evaluación prospectiva de la sostenibilidad. Para ello, se partió de la caracterización y modelado de la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar en Colombia, posteriormente se identificaron seis indicadores de sostenibilidad a evaluar, consumo de agua, calidad de agua, empleos, tenencia de tierra, productividad y flexibilidad, estos relacionados con toda la cadena de suministro, los indicadores utilizados fueron propuestos por la Asociación Mundial de Bioenergía-GBEP.

La simulación del modelo se realizó con la información de la producción de bioetanol de caña de azúcar en Colombia del año 2006 al 2015, con una capacidad instalada de 450 millones de litros para el año 2016.

Para la evaluación de sostenibilidad realizada se propuso una síntesis metodológica en la que parte con el modelado de la cadena de suministro de bioetanol, utilizando Dinámica de Sistemas, y luego se conectaron y modelaron los indicadores de sostenibilidad definidos; posteriormente para saber si los indicadores evolucionan a través de regiones deseadas, que corresponderían a los objetivos del sector y los objetivos de sostenibilidad, se utilizó el concepto de restricciones, desarrollado en la Teoría de Viabilidad, aquí, regiones deseadas del estado de los indicadores se definieron, tales como: Región deseada, Región de alerta y Región no deseada. Estas regiones fueron definidas teniendo en cuenta normativa colombiana y panorama internacional de producción de bioetanol.

Los indicadores evaluados con esta metodología fueron: consumo de agua, calidad de agua (expresado en Demanda Biológica de Oxígeno) y empleos generados en la producción de

bioetanol. Los resultados muestran importantes hallazgos para el modelado, monitoreo y evaluación de la sostenibilidad en los biocombustibles, utilizando indicadores, proporcionando así, un método el cual se debe utilizar partiendo de la representación de una cadena de suministro de determinado biocombustible y visualizando la afectación al estado de los indicadores para evaluar las mejores estrategias o políticas que permitan alcanzar unas regiones objetivo definidas. En este sentido, se discute la necesidad de diseñar e implementar políticas claras de sostenibilidad para la planificación e incremento de capacidad instalada de producción de bioetanol. Este trabajo aporta las bases para construir herramientas que permitan a los responsables de formular políticas en diferentes contextos del sector, la inclusión de los aspectos de desarrollo sostenible.

Palabras clave: Dinámica de Sistemas, Biocombustibles, Sostenibilidad, Bioetanol, Cadena de suministro.

Modeling for Sustainability Assessment in Bioethanol Supply Chain.

Abstract

Sustainability is currently one of the most important concepts in scientific research and government programs in different countries (Nabavi et al., 2017). This applies to all productive sectors that are expanding in local and global economies. One of the most significant sectors for the implementation and evaluation of sustainability is the biofuels sector due to its constant growth and doubts about socio-environmental impacts. Colombia, the tenth largest producer of bioethanol in the world and third in Latin America, however, the future implications of the social and environmental companies of its production have not yet been demonstrated and are widely discussed from different angles.

In this doctoral thesis document, it was possible to establish a model that represents the supply chain of bioethanol in Colombia, with the linkage of indicators, that allow the prospective evaluation of sustainability. To do this, the characteristics and model of the supply chain of sugarcane bioethanol in Colombia were identified. Six indicators of sustainability were identified: value, water consumption, water quality, jobs, land tenure, productivity and flexibility, these indicators were used for the Global Bioenergy Partnership (GBEP).

The simulation of the model was carried out with information on bioethanol production of sugarcane in Colombia from 2006 to 2015, with an installed capacity of 450 million liters by 2016.

For the sustainability assessment, a methodological synthesis was made in the part with the model of the bioethanol supply chain, using Dynamics of Systems, and then the defined sustainability indicators were connected and modeled; subsequently to know if the indicators evolve through desired regions, corresponding to sector objectives and sustainability objectives, we use the concept of constraints, developed in the Viability Theory, here, the desired regions of the state of the indicators stories were defined as: Desired Region, Alert Region and Undesired Region. These regions were defined taking into account Colombian regulations and an international bioethanol production scenario.

The indicators evaluated with this methodology were: water consumption, water quality (expressed in Biological Demand of Oxygen) and jobs generated in the production of bioethanol. The results are important for the model, monitoring and evaluation of sustainability in biofuels, indicators of use, thus providing a method which should be used to partition the representation of a supply chain of a given biofuel and visualizing the indicators to assess the best strategies to achieve the defined target regions. In this sense, the need to design and implement clear sustainability policies for planning and increasing the installed capacity of bioethanol production is discussed. This work provides the basis for the construction of tools that allow policymakers in different contexts of the sector to include sustainable development projects.

Key words: System Dynamics, Biofuels, Sustainability, Bioethanol, Supply Chain.

Contenido General

Capítulo 1. Introducción a la Tesis	16
1.1 Introducción.....	16
1.2 Mapa del documento	19
1.3 Planteamiento del Problema	19
1.4 Justificación.....	21
1.5 Objetivos.....	23
1.5.1 Objetivo General.....	24
1.5.2 Objetivos Específicos	24
1.6 Análisis de evaluación de sostenibilidad	24
1.6.1 Dinámica de Sistemas y Sostenibilidad.....	26
1.7 Metodología de investigación.....	32
Capítulo 2. Caracterización de la cadena de Suministro de Bioetanol	35
2.1 Biocombustibles panorama general.....	35
2.2 Contexto Colombiano.....	37
2.3 La Cadena de Suministro de bioetanol en Colombia.	39
2.3.1 La materia prima.....	40
2.3.2 El Proceso productivo.....	41
2.3.3 Uso y Mezcla de Bioetanol en Colombia	42
2.4 Sostenibilidad de Biocombustibles panorama general.	45
2.5 Indicadores GBEP	47
2.5.1 GBEP y la aplicación para el Bioetanol en Colombia.....	48
• Conclusiones de capítulo 2.	49
Capítulo 3. Síntesis Metodológica para la evaluación de sostenibilidad	51
3.1 Construcción de Modelos de Simulación con Dinámica de Sistemas.....	52
3.2 Evaluación Prospectiva y viabilidad.....	54
• Conclusiones de capítulo	58
Capítulo 4. Modelado y evaluación de indicadores de sostenibilidad	60
4.1 Modelado del Sistema a estudiar.	60
4.2 Comportamiento del Modelo.....	66
4.3 Validación del Modelo de la Cadena.....	68
• Prueba de condiciones extremas.....	72
• Prueba de Sensibilidad.....	73

4.4 Conclusiones de Capítulo.....	74
Capítulo 5. Modelado y Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad.....	75
5.1 Definición de los Indicadores de Sostenibilidad	76
5.1.1 Indicadores Ambientales	78
5.1.2 Indicadores Sociales	78
5.1.3 Indicadores Económicos.....	79
5.2 Modelamiento de los indicadores.....	80
5.2.1 Evaluación de los Indicadores de Sostenibilidad.....	80
• Pilar Ambiental	81
• Pilar Social.....	88
• Pilar Económico.....	92
5.3 Políticas y estrategias de Gestión.....	94
5.3.1 Indicador Consumo de agua.....	94
• Técnicas de irrigación para la disminución del consumo de agua.....	95
5.3.2 Empleos	96
5.3.3 DBO.....	98
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones	101
6.1 Conclusiones generales.....	101
6.2 Recomendaciones a la política nacional de biocombustibles.....	102
6.3 Trabajos futuros.....	103
Referencias	105
ANEXOS	115

Lista de Figuras

Figura 1. Publicaciones Realizadas sobre Dinámica de Sistemas y los aspectos de sostenibilidad (2015-2017).....	27
Figura 2. Meta de los Objetivos	33
Figura 3. Producción de alcohol carburante.	38
Figura 4. Ubicación geográfica de la producción de bioetanol en Colombia.....	39
Figura 5. Cadena de Suministro de Bioetanol de Caña.	40
Figura 6. Cadena de Suministro de bioetanol de caña.....	40
Figura 8. Porcentaje de Mezcla de Bioetanol en Colombia.	43
Figura 9. Límite de la Cadena de Suministro de Bioetanol de caña.....	44
Figura 10. Indicadores Ambientales, Sociales y Económicos.....	46
Figura 11. Aplicación de los indicadores GBEP en la Cadena de suministro del Bioetanol en Colombia.....	49
Figura 12. Comparación entre las etapas del modelado con Dinámica de Sistemas.....	53
Figura 13. Evaluación prospectiva de indicadores de sostenibilidad.	57
Figura 14. Evaluación de un indicador que no cumple con la región deseada.	57
Figura 15. Ejemplos de evaluación de indicadores que no cumplen con la región deseada.	58
Figura 16. Marco metodológico para la evaluación de la sostenibilidad en biocombustibles.	59
Figura 17. Límites de la cadena de suministro de bioetanol utilizada en este estudio.	60
Figura 18. Hipótesis dinámica inicial.	61
Figura 19. Diagrama Causal de la cadena de suministro de bioetanol.	62
Figura 20. Diagrama de Niveles y Flujos de la cadena de suministro de bioetanol.....	63
Figura 21. Función a trozos que representa el incremento neto.	64
Figura 22. Función a trozos que representa el incremento de producción de bioetanol.....	65
Figura 23. Simulación de las Hectáreas de caña de 2006-2030	67
Figura 24. Simulación del Bioetanol producido de 2006-2030.....	67
Figura 25. Simulación de la productividad.....	67
Figura 26. Comparación entre datos históricos de producción de Bioetanol y datos de simulación.....	68

Figura 27. Comparación entre datos históricos de Molienda de caña y datos de simulación.	71
Figura 28. Comparación entre datos históricos de hectáreas de caña y datos de simulación.	72
Figura 29. Escenarios de condición extrema de cultivos con variación de demanda.....	72
Figura 30. Escenarios de condición extrema de producción de bioetanol.....	73
Figura 31. Análisis de sensibilidad numérica.....	74
Figura 32. Estructura Sistémica general con indicadores de sostenibilidad.....	75
Figura 33. Diagrama causal con indicadores de sostenibilidad.....	81
Figura 34. Indicador Uso y eficiencia del agua.....	82
Figura 35. Función a trozos que representa la política de ahorro.....	83
Figura 36. Simulación del consumo de agua con tres escenarios de estrategias de ahorro..	84
Figura 37. Diagrama Causal Indicador calidad del agua.....	86
Figura 38. Diagrama Niveles y Flujos del indicador calidad de agua.....	86
Figura 39. Simulación de Demanda Biológica de Oxígeno, con aumento de remoción.....	87
Figura 40. Diagrama Causal Indicador Empleos.....	88
Figura 41. Diagrama Niveles y Flujos Indicador Empleos.....	89
Figura 42. Indicador Tenencia de tierra para producción de bioetanol.....	90
Figura 43. Simulación del Indicador Asignación y tenencia de tierra y cambios en el porcentaje.....	91
Figura 44. Diagrama Niveles y Flujos Indicadores Económicos.....	92
Figura 45. Simulación del indicador productividad.....	93
Figura 46. Evaluación prospectiva del indicador consumo de agua.....	95
Figura 47. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador agua.....	96
Figura 48. Evaluación prospectiva del indicador Empleos.....	97
Figura 49. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador empleos.....	98
Figura 50. Diagrama de Niveles y Flujos del indicador agua, con implementación de políticas.....	99
Figura 51. Evaluación prospectiva del indicador Calidad de Agua.....	99

Figura 52. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador Calidad de Agua.	100
Figura 53. Diagrama causal con indicadores de sostenibilidad.....	116
Figura 54. Diagrama de Niveles y Flujos con módulos de sostenibilidad.	117
Figura 55. Chequeo de unidades desde el Software Vensim Ple.....	119
Figura 56. Análisis de Sensibilidad en el consumo de agua.....	120
Figura 57. Análisis de Sensibilidad en Eficiencia de remoción de DBO y generación de vinazas.	121
Figura 58. Análisis de Sensibilidad en cambios en el ratio empleos-producción.	122
Figura 59. Análisis de Sensibilidad cambios en la demanda (a) y aumento y disminución de capacidad de producción (b) y (c).	123

Lista de Tablas

Tabla 1. Investigaciones sobre aspectos de sostenibilidad.	28
Tabla 2. Fuentes y materias primas para obtención de Bioetanol.	37
Tabla 3. Capacidad instalada de bioetanol en Colombia.....	44
Tabla 4. : Indicadores de Sostenibilidad del GBEP.....	47
Tabla 5. Parámetros y condiciones iniciales del modelo.....	69
Tabla 6. Estimación de tasa de incremento de Cultivo de caña 69	69
Tabla 7. Estimación tasa de incremento de Producción de Bioetanol.....	70
Tabla 8. Caña Molida y Hectáreas de caña sembrada.	70
Tabla 9. MAPE de simulación de tres principales variables.	71
Tabla 10. Evaluación cualitativa de uso de indicadores.	76
Tabla 11. Información sobre técnicas de ahorro de agua.	95
Tabla 12. Descripción de escenarios de indicador Empleo.	97
Tabla 13. Información sobre políticas de incremento de umbrales de remoción de Demanda Biológica de Oxígeno.	100
Tabla 14. Ecuaciones.....	118

Capítulo 1. Introducción a la Tesis

1.1 Introducción.

Los biocombustibles son considerados como una opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incrementar la diversidad de la canasta energética, fuente de creación de trabajo y desarrollo rural (Scarlat y Dallemand, 2011). Estos, han sido desarrollados e implementados en diferentes escalas a nivel mundial y son parte fundamental en la estrategia de aplicación de energías renovables y programas de diversificación energética, para lograr una seguridad energética en las naciones (Sharma et al, 2013).

Los principales argumentos para promover los biocombustibles planteados por (Hill et al, 2006) y citados por (Bautista, 2015) son sus posibles efectos positivos en las dimensiones ambiental, económica y social, ya que, ayudarían a la humanidad a reducir los impactos negativos del uso de combustibles fósiles y la dependencia a los mismos, y a su vez, a ampliar las fuentes de energías renovables actuando como una materia prima sostenible para la energía y los subproductos de biomasa aprovechables. De igual manera, (Bautista, 2015) plantea que, la generación de empleo atribuida a los biocombustibles especialmente en las zonas rurales de los países en desarrollo, permitiría a los gobiernos incentivar e implementar políticas para reducir la pobreza y la desigualdad social, siendo la generación de empleo y beneficios sociales, un tema de las agendas de gobierno en los distintos países con producción agrícola.

Aunque los biocombustibles tienen muchas ventajas como las mencionadas anteriormente, el aumento de su aplicación también genera interrogantes sobre los potenciales impactos negativos ambientales y sociales (Mata et al, 2013), por lo tanto, hay algunas preocupaciones sobre los posibles impactos locales y globales con respecto a: El aporte al cambio climático, la seguridad alimentaria, afectaciones ambientales y el verdadero desarrollo económico, que aún son discutidas en distintos contextos (Valencia y Cardona, 2014). Dando así, lugar a las discusiones sobre las herramientas requeridas para la medición del impacto que los biocombustibles puedan tener en el marco del desarrollo sostenible, donde el concepto aceptado de desarrollo sostenible es, la integración del desarrollo económico con la

protección ambiental y los beneficios sociales (Dresner, 2002), considerado también como un objetivo global de las naciones.

Los biocombustibles más consolidados a nivel industrial en el mundo son: El bioetanol y el biodiesel, producidos a partir de distintas materias primas provenientes en su mayoría de cultivos agrícolas. Uno de los ampliamente conocidos y usados en el sector transporte Colombiano, es el bioetanol, el cual, es un tipo de biocombustible que puede ser utilizado de manera directa o como aditivo oxigenante de la gasolina (Sánchez, 2008). Éste, se obtiene a partir de materias primas ricas en azúcares fermentables como la caña de azúcar, el maíz y la remolacha azucarera. En esta tesis Doctoral, se ha modelado la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar en el contexto Colombiano, ya que, en este país, la mayor producción de bioetanol se obtiene a partir de este cultivo agrícola, lo cual ha permitido el desarrollo y maduración de clústers de industria alcohólica junto a la ya consolidada industria azucarera. El etanol (C_2H_5OH) también denominado bioetanol, por su producción a partir materias primas renovables como la biomasa, es reconocido como una fuente energía prometedora sobre la gasolina (C_7H_{17}), debido a que tiene varias ventajas en sus propiedades. Según (Nigam, 2011), un litro de bioetanol genera el 66% de la energía que proporciona la misma cantidad de gasolina, resaltando que el primero, tiene un número de octanaje más alto (106-110), que el último (91-96), lo que mejora el rendimiento de la gasolina cuando se mezcla con bioetanol. Cabe resaltar que, el bioetanol también se le denomina combustible oxigenante, debido a que en su composición contiene el 34,78% de oxígeno, mientras que en la gasolina, el oxígeno está ausente (Zabed et al, 2016). Es por esto que se usa como aditivo en la gasolina y está inmerso en el mercado energético del sector transporte. Con respecto a la evaluación ambiental del bioetanol, se han realizado diferentes aproximaciones para la identificación de impactos ambientales, entre los cuales se encuentran emisiones atmosféricas, afectación al recurso hídrico, vertimientos, residuos sólidos, gases de efecto invernadero entre otros (CUE, 2012; Valencia y Cardona, 2014). Sin embargo, esto se ha realizado desde el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida, donde se estudian impactos pasados y presentes, adicionalmente, se requiere de realizar una evaluación desde la perspectiva de sostenibilidad, es decir, que se integre y visualicen los aspectos sociales, económicos y ambientales relacionados con todo el proceso productivo.

A nivel global, se han desarrollado en diferentes contextos, aproximaciones a evaluación de la sostenibilidad en la producción de biocombustibles utilizando indicadores de medición, donde, se aplican y proponen metodologías y modelos para varios países, en los que se involucran las valoraciones sociales, ambientales y económicas como los desarrollados y

referenciados por (Díaz-Chávez, 2011). Con ese mismo propósito, se encuentran ampliamente divulgados los indicadores de sostenibilidad de la Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP en Inglés). La cual, representa a los países vinculados que están produciendo energía de biomasa, ésta asociación, nació por iniciativa de la Comisión de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Es así como GBEP, desarrolló un conjunto de veinticuatro (24) indicadores para la evaluación y producción sostenible de bioenergía, este, fue el primer consenso mundial de los gobiernos para evaluar la sostenibilidad y uso de bioenergía (GBEP, 2011). Estos indicadores se basan en los tres pilares de la sostenibilidad: sostenibilidad económica, social y ambiental. Los indicadores del GBEP, como se les denomina, se enfocan en la producción a un nivel nacional y/o regional del mercado de la bioenergía, así, como en todo el ciclo de vida del biocombustible a estudiar (Hayashi, Ierland y Zhu, 2014). Estos indicadores, requieren de evaluación y monitoreo con información contextualizada y actualizada. Si bien es cierto que, estos indicadores son pertinentes en cualquier contexto, la información y los datos con los que se evalúan son datos históricos que permiten ver lo que ocurrió y lo que ocurre en el presente, pero no un panorama de lo que va a pasar en el futuro o visualizar escenarios tendenciales de los indicadores bajo intervenciones de decisiones. Dado esto, se requiere entonces de una metodología de representación sistémica, que permita el estudio del cambio temporal, y la forma en que se vincula la información expuesta por los indicadores y que a su vez, permita ver los comportamientos emergentes del sistema que evidencien la evolución y la adaptación, si la existe, a unos escenarios u objetivos deseados de sostenibilidad.

Dado lo anterior, el principal propósito de esta tesis, es hacer una contribución novedosa al sector de biocombustibles, específicamente a el bioetanol de caña de azúcar, desarrollando un modelo basado en la metodología de Dinámica de Sistemas y complementado con los conceptos de oportunidad, necesidad y adaptación, propuestos en la Teoría de Viabilidad, para entender el comportamiento de las variables que afectan los indicadores de sostenibilidad asociados a la cadena de suministro de bioetanol en Colombia, y la forma de en qué se comportan dichos indicadores de sostenibilidad, bajos restricciones o intervenciones de estrategias o políticas .

El modelo desarrollado fue evaluado con una cadena de suministro del sector de bioetanol de caña de azúcar con la información de capacidad de producción del 2006 al 2015. De esta forma, la propuesta metodológica que se realiza, busca establecer si los estados futuros de los indicadores afectados por sistema productivo, se encuentran en estados deseados definidos con intervalos de evaluación, a esto se le denominó: la evaluación prospectiva de

indicadores de sostenibilidad.

1.2 Mapa del documento

En el resto del Capítulo 1, se presenta el planteamiento del problema y la justificación con los respectivos objetivos planteados. Adicionalmente en la sección 1.6 se realiza la revisión y discusión de trabajos actuales (2015-2017) en los que se aplica Dinámica de Sistemas para problemas asociados a la sostenibilidad. En la sección 1.7 se muestra el resumen de la metodología llevada. En el Capítulo 2, se presenta una caracterización de la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar, partiendo de una contextualización de los biocombustibles a nivel mundial, llegando al panorama de producción de bioetanol en Colombia; así como una breve discusión sobre la sostenibilidad de biocombustibles y los indicadores de sostenibilidad GBEP.

En el Capítulo 3, se presenta la síntesis metodológica a utilizar para la evaluación de sostenibilidad, donde se presentan los fundamentos conceptuales de oportunidad, necesidad y adaptación, desarrolladas en el contexto de la y de la Teoría de la Viabilidad y la aplicación en Dinámica de sistemas para la evaluación prospectiva de sostenibilidad de bioetanol.

En el Capítulo 4, se presenta todo el proceso de modelado con Dinámica de Sistemas, partiendo de la construcción del modelo de cadena de suministro, con sus respectivas pruebas y validación.

En el Capítulo 5, se presenta la descripción y modelado de los indicadores de sostenibilidad evaluación de indicadores de sostenibilidad. Así como la evaluación prospectiva de indicadores de sostenibilidad, bajo políticas de gestión.

Finalmente en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones con relación a los objetivos, el aporte de la tesis a la comprensión del problema, trabajo futuro y la discusión sobre la evaluación de sostenibilidad en la formulación de futuras políticas públicas con respecto a bioetanol y biocombustibles, finalmente, se presenta un listado de productos de investigación obtenidos durante el desarrollo de esta tesis.

1.3 Planteamiento del Problema

Las políticas del gobierno Colombiano están orientadas a que la producción de biocombustibles y bioetanol específicamente, siga en crecimiento, teniendo en cuenta el alto potencial y las amplias extensiones de terreno inexplorado que tiene el país para esto. De igual manera, el uso del bioetanol en el sector transporte, se encuentra fomentado por el

Decreto 1135 de 2009 del gobierno Colombiano, donde se estableció que a partir del 1 de enero del año 2012, los vehículos automotores hasta 2.000 cm³ de cilindrada que se fabriquen, ensamblen, importen, distribuyan y comercialicen en el país y que requieran para su funcionamiento gasolina, deben estar acondicionados para que sus motores funcionen con sistema Flex-fuel (E85), es decir, que puedan funcionar normalmente utilizando indistintamente gasolinas básicas o mezclas compuestas por gasolina básica de origen fósil con al menos 85% de etanol. Sin embargo, en la actualidad la gasolina que se comercializa en el país es E10, es decir 90% gasolina y 10% bioetanol. La baja mezcla de bioetanol es causada principalmente por la alta demanda que tiene el país de este combustible y por la capacidad instalada limitada que tiene el país para la producción de bioetanol, esto limita esa flexibilidad. Por lo tanto, se fortalece la apuesta del gobierno para incrementar la producción en el corto y mediano plazo, ahora bien, para esto, se deben tener en cuenta los lineamientos de sostenibilidad que se establecieron en el CONPES 3510 (2008), el cual, busca que el país logre una producción eficiente y sostenible de biocombustibles.

Dado lo anterior, es necesario tener herramientas y metodologías de evaluación y monitoreo de los aspectos e impactos ambientales y sociales, relacionados con el proceso productivo del bioetanol a lo largo de la cadena de suministro.

Partiendo de la propuesta de la Asociación Mundial de Bioenergía, y sus indicadores de sostenibilidad propuestos para la evaluación de bioenergía, se evidencia la necesidad de proporcionar a los formuladores de políticas del sector y a otras partes interesadas, un conjunto de herramientas sistémicas y analíticas que pueden informar sobre el desarrollo de políticas y programas nacionales de bioenergía y así monitorear el impacto actual y futuro de las mismas (GBEP, 2011), para esto se deberían tener metas, programas o políticas sostenibles definidas. Sin embargo, en países en vía de desarrollo como Colombia, no hay definidos unos objetivos de sostenibilidad para el sector de bioetanol ni los otros biocombustibles, tampoco es claro, cómo se podría implementar de manera permanentemente una estimación y monitoreo de los indicadores de sostenibilidad propuestos, ni cómo se podría evaluar prospectivamente estos indicadores, teniendo en cuenta estados futuros de los indicadores, pues aunque se pueda conseguir información histórica revelaría el comportamiento pasado o panorama actual de los indicadores. Dado lo anterior se requiere de modelos sistémicos que permitan observar la integración de la cadena de suministro de Bioetanol, y los indicadores de sostenibilidad en sus diferentes etapas, y a su vez proponer un marco de referencia para lograr una evaluación prospectiva de la sostenibilidad.

1.4 Justificación.

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar en Colombia es un proceso biotecnológico ampliamente conocido, investigado y consolidado a nivel industrial. En Colombia, la producción de bioetanol se ha incrementado exponencialmente pasando de los 100.000 litros día en 2006 a 1'250.000 litros en 2015 y 1'650.000 litros en 2016, y se espera que a final del 2017 la capacidad instalada llegue a los 2'000.000 de litros/día.

Sin embargo, lo que cuestiona esta veloz evolución, es el marco de su crecimiento en la economía Colombiana dentro de la filosofía del desarrollo sostenible, sin vincular o desarrollar metodologías para identificar y evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos, es decir una evaluación de sostenibilidad de cara al incremento de producción.

En el contexto internacional, se evidencia que en los últimos años la producción de bioetanol también se ha incrementado de manera exitosa a nivel mundial, pero esto, se debe a la implementación de medidas y políticas que incentivan su producción local (Scarlat y Dallemand, 2011) vinculando esquemas de producción sostenible, a lo cual debe llegar Colombia.

De acuerdo con (Ness et al, 2007), el propósito de la evaluación de sostenibilidad es proveer a los tomadores de decisiones, de una evaluación de lo global a lo local, de sistemas socio-naturales integrados con perspectivas de corto y largo plazo, de esta forma, se podría determinar o proponer acciones que aporten a la sostenibilidad o a metas definidas. Por lo tanto, para una adecuada toma de decisiones en este sector o la identificación de acciones a implementar, es necesario cuantificar la sostenibilidad, o tener una medida aproximada, según Mata, (et al, 2013) en la práctica, esto se podría hacer definiendo un cierto número de indicadores escogidos, de tal manera que se consideren los aspectos pertinentes al sistema en estudio desde una perspectiva de sostenibilidad. Es claro que, el instrumento a utilizar son indicadores, también es claro que, el direccionamiento del gobierno Colombiano es seguir aumentando su capacidad de producción, dado que estos sistemas de producción son bastante complejos y tienen un gran número de factores que influyen en la sostenibilidad de su producción (Janssen y Rutz, 2011), se debe describir cómo los impactos ambientales y sociales en la producción de bioetanol, están asociados a distintas etapas de la cadena de suministro y cómo se afectan los indicadores por la producción. Cabe resaltar que, la aplicación de los principios de sostenibilidad en las cadenas de suministro es un área de investigación en evolución y crecimiento y actualmente sufre de una escasez de teorías establecidas, modelos y marcos conceptuales (Ahí y Searcy, 2015), donde la principal

debilidad es la evaluación en el tiempo futuro o de manera prospectiva.

De acuerdo con las investigaciones mencionadas anteriormente, se discute que hay una necesidad para el desarrollo de metodologías de medición y monitoreo de la sostenibilidad de la producción de biocombustibles a nivel mundial. Se está buscando tener en cuenta toda la cadena de suministro, es decir, desde la producción de materias primas, hasta el uso final o mezcla con otros combustibles. Se evidencia también que, las políticas de producción de biocombustibles a nivel mundial se han enfocado a construir proyectos y estándares de sostenibilidad para implementar en las economías nacionales. Incluso, muchos países productores de biocombustibles han investigado, han implementado o están considerando la oportunidad de introducir la producción sostenible de biocombustibles en sus objetivos de gobierno para fortalecer sus sistemas nacionales de energía (Pacini, et al 2013).

Para la comprensión de estos sistemas productivos asociados a sistemas socio-ecológicos y sus impactos sobre la sostenibilidad, su estudio debe ser abordado desde una perspectiva holística y sistémica que permita una evaluación integrada de los factores socioeconómicos y ambientales, así como las interacciones lineales y no lineales y retroalimentación que caracterizan estos sistemas complejos socio-ecológicos (Banos-Gonzalez et al, 2016). Dentro de las metodologías que permiten esto, se encuentra la Dinámica de Sistemas, la cual puede ser una poderosa herramienta para entender dinámicas, especialmente comportamientos de realimentación, en muchos sistemas socio-ambientales donde se busca la sostenibilidad (Nabavi, et al 2017). De igual manera, para la medición de la sostenibilidad, se requiere de una mejor visualización desde el punto de vista de cuantificación, es así como la vinculación de indicadores se hace importante.

De acuerdo con Díaz-Chavez (2011), el uso de indicadores provee un panorama para la generación y análisis de información, ya que, son útiles para compartir, comparar y para facilitar la toma de decisiones a las diferentes partes interesadas, en la construcción de políticas de sostenibilidad en diferentes contextos. Sin embargo, la evaluación y monitoreo de estos indicadores se realiza con base en datos históricos y comportamientos presentes y pasados. Siendo esto una debilidad de las metodologías actuales, ya que, es necesario la vinculación de la estructura del sistema y definición de reglas de evolución, con el fin de visualizar los distintos escenarios, de futura proyección de producción de biocombustibles y el comportamiento de los indicadores de sostenibilidad en el futuro, es decir es necesario una evaluación prospectiva.

Teniendo en cuenta la necesidad de herramientas dinámicas para una evaluación de

sostenibilidad que aborde las preocupaciones mencionados anteriormente, el propósito general de esta investigación es definir un modelo que permita a los actores y partes interesadas de la cadena de suministro de bioetanol evaluar la sostenibilidad de la producción donde se vinculen los indicadores de sostenibilidad GBEP en la producción de bioetanol en Colombia, mediante el modelado con Dinámica de Sistemas y la integración ideas de oportunidad, necesidad y adaptación de la Teoría de Viabilidad.

De esta manera, esta Tesis Doctoral busca Establecer un Modelo que represente la cadena de suministro de bioetanol, desde la obtención de materias primas hasta la venta o mezcla con la gasolina, dando lugar a la vinculación de indicadores ambientales, sociales y económicos que permitan la evaluación prospectiva de la sostenibilidad de una cadena de suministro de bioetanol, estableciendo si los estados futuros del sistema productivo, es decir sus indicadores, se encuentran en estados deseados.

1.5 Objetivos

Los objetivos propuestos se presentan a continuación:

1.5.1 Objetivo General

- Establecer un modelo que represente la cadena de suministro de bioetanol en Colombia, con la vinculación de indicadores, que permitan la evaluación prospectiva de la sostenibilidad.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar y modelar la cadena de suministro de bioetanol de Caña en Colombia
- Identificar los indicadores de sostenibilidad a evaluar en la cadena de suministro.
- Obtener escenarios para la evaluación prospectiva de la sostenibilidad de bioetanol.

1.6 Análisis de evaluación de sostenibilidad

El concepto de desarrollo sostenible, ha marcado un punto en el que se han enfocado los tomadores de decisiones de las industrias en las últimas décadas (Singha et al, 2012), tanto

así, que el Consejo Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, 1997) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2002), tomaron la iniciativa y fueron la clave para la adopción y la evaluación de la sostenibilidad en las industrias (GRI, 2002), incluyendo la industria de los biocombustibles, la cual es ampliamente conocido que se ha aumentado su participación en las economías a nivel mundial.

Diferentes métodos para la evaluación de sostenibilidad en biocombustibles y producción de bioenergía se han desarrollado, antes de la propuesta del GBEP (Elghali et al, 2007; Buchholz et al, 2007; Acosta-Michlik et al, 2011; Gnansounou, 2011; Afgan et al, 2000) dentro de estos se destaca la aplicación de análisis multicriterio-AMC, lógica difusa, análisis de ciclo de vida-LCA. En consecuencia, existe una amplia discusión acerca de qué tipo de herramientas se deben seguir para tener una evaluación de sostenibilidad aproximada y contextualizada a las economías locales y regionales y sobre qué nivel de desagregación deben tener las variables a medir. Algunos puntos en común indican el requerimiento de una perspectiva sistémica y holística, que pueda integrar los pilares de la sostenibilidad dentro del ciclo de vida del producto, es decir, la cadena de suministro del biocombustible a evaluar y sus materias primas (Mata, 2013).

Otro de los aportes importantes a la evaluación de sostenibilidad, ha sido la inclusión de la necesidad de cuantificar la sostenibilidad por medio de indicadores. Existen numerosos esfuerzos encaminados para el desarrollo de indicadores de sostenibilidad en el sector de bioenergía, mencionados por (Efroymsen et al, 2013), los cuales, han permitido la construcción de esquemas mundiales para la sostenibilidad de biocombustibles como el propuesto por la Asociación mundial de bioenergía –GBEP (2011). Los indicadores proveen información sobre efectos potenciales o reales de las actividades humanas actividades industriales específicas (Dale et al, 2013), en este sentido, para una evaluación exitosa de sostenibilidad con indicadores, estos deben haber sido escogidos dentro de un contexto bien definido. Así mismo, para la medición se debe recopilar información histórica sobre la producción y los aspectos ambientales, sociales y económicos que hacen parte de la cadena productiva a estudiar, siendo este un punto de precaución, pues la información no es de fácil acceso o cuesta medir y conseguir la información pertinente en cada una de las partes o etapas que conforman la cadena. Aunque por su practicidad y utilidad, los indicadores son ampliamente utilizados en LCA y AMC. Sin embargo, debido al enfoque temporal que aportan los indicadores, hace que se obtenga una evaluación retrospectiva (Díaz-Chávez, 2016), es decir, un panorama de la situación pasada y posiblemente un estado actual, siendo esto una limitante para los tomadores de decisiones con respecto a al impacto o situación

futura que pueda presentarse u ocurrir por la evolución ya sea negativa o positiva de la sostenibilidad del sistema a estudiar. Emergiendo así, la necesidad de modelar los indicadores y simular de los estados futuros de los indicadores. Adicionalmente, Diaz-Chavez (2016) plantea que, las metodologías de evaluación de sostenibilidad deben evolucionar de manera continua y acomodarse o adaptarse al incremento y diversificación, en este caso, a la diversificación de biomasa y materias primas para la producción de biocombustibles. Teniendo en cuenta esto y que los sistemas de producción de biocombustibles son sistemas complejos que cambian y evolucionan en el tiempo, es necesario soportar la evaluación de sostenibilidad con modelos que permitan estimar o visualizar tendencias de comportamiento (Ahí y Searcy, 2015), con el fin de definir unas medidas necesarias para lograr los objetivos propuestos o evaluar estrategias o políticas de sostenibilidad con unos tiempos de evaluación apropiados para el contexto (Efroymsen et al, 2013).

Dentro de las metodologías de modelamiento y simulación que involucran tanto la concepción sistémica, como la visualización de escenarios futuros se encuentra la Dinámica de Sistemas, la cual es una metodología para el estudio y manejo de sistemas complejos, incluyendo sistemas sociales y ambientales (Sterman, 2013). Ésta es útil para la comprensión del comportamiento fundamental de los sistemas en el tiempo, teniendo en cuenta tanto los retardos de información y materiales, como las estructuras de realimentación (Forrester, 1961, Aracil y Gordillo, 1997, Sterman, 2000). Esta herramienta ha dado importantes aportes para la comprensión de la sostenibilidad en diferentes contextos, educación, industria productiva, cadenas de suministro, cambio climático entre otros (Sterman, 2014). Esta metodolgia será discutida en mayor detalle en el Capítulo 3.

En la siguiente sección se describe uso de la Dinámica de Sistemas en el área de la sostenibilidad, basado en publicaciones de alto impacto en los últimos tres años.

1.6.1 Dinámica de Sistemas y Sostenibilidad

El uso de la Dinámica de Sistemas en la evaluación de sostenibilidad y los elementos que lo constituyen, ha aumentado considerablemente en los últimos años (Nabavi et al, 2017). A continuación se presenta una breve revisión de 50 publicaciones en revistas científicas de alto impacto del año 2015, 2016 y 2017, donde utilizan la metodología de modelamiento con

Dinámica de Sistemas para diferentes temas y subtemas subyacentes a la sostenibilidad. Una vez obtenidos los resultados de las bases de datos científicas, se conformaron seis grandes grupos de temas de investigaciones afines, estos son: Residuos, Energías Renovables, Agricultura, Emisiones atmosféricas, Agua y Sostenibilidad en general. Como se presenta en la Figura 1.



Figura 1. Publicaciones Realizadas sobre Dinámica de Sistemas y los aspectos de sostenibilidad (2015-2017)

Los modelos existentes para cada uno de los grupos de temas revisados representan importantes aportes a la evaluación de sostenibilidad. Sin embargo, un punto importante de partida hacia el futuro de los biocombustibles y la sostenibilidad es, tener claro que, la medición de aspectos de la sostenibilidad no es una única “llave que abre todas las puertas”, esta debe vincular las partes interesadas, determinar objetivos claros y objetivos para la evaluación en contextos específicos (Díaz-Chávez, 2016) estos contextos son: espacial y temporal, en los que se defina tanto la ubicación y delimitación de la cadena de suministro a estudiar con sus respectivas variables socioeconómicas y ambientales de la región y área de influencia directa e indirecta, como la obtención de información sobre la producción del presente y del pasado con un límite temporal apropiada y pertinente para la evaluación (Dale et al, 2013).

Dentro de la revisión de las investigaciones publicadas, se encontró que, en (Espinoza et al,

2017), construyeron un modelo para la evaluación de sostenibilidad de Biodiesel de palma, en el cual evaluaron dos escenarios, uno sin ninguna intervención y con crecimiento constante y el otro con incrementos de producción, resultando como mayor impacto en el pilar ambiental, el cambio de uso de suelo, debido un incremento de los cultivos de palma. Sin embargo, no se encontraron modelos de simulación que involucren el modelado de indicadores de sostenibilidad en la cadena productiva de bioetanol, ni objetivos o regiones deseadas, como los que se abordan en esta tesis.

Cabe resaltar a, (Singha et al, 2012) donde plantea que, para la evaluación de indicadores de sostenibilidad de manera prospectiva, se requiere partir de los siguientes tres elementos: i) El contexto de evaluación de la actividad debe estar claramente delimitado y ii) Que la construcción de los indicadores o medida de los indicadores y su contexto relacionado sea validado, iii) Un análisis de sensibilidad, análisis de incertidumbre y error, puede ayudar en la eficacia y robustez de lo que se está midiendo o evaluando en los estados futuros.

Dado lo anterior, para el desarrollo de esta tesis se planteó una síntesis metodológica para la evaluación de sostenibilidad en la cadena de suministro de bioetanol, la cual es presentada en detalle en el Capítulo 3.

El detalle de las publicaciones de Dinámica de Sistemas y Sostenibilidad se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Investigaciones sobre aspectos de sostenibilidad.

Nota: En estas publicaciones se utiliza Dinámica de Sistemas (2015-2017) para el estudio de cada tema.

<i>Tema de investigación</i>	<i>Subtema</i>	<i>Revista</i>	<i>Cita</i>	<i>Número</i>
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	--------------------	----------------------

Residuos	Reciclaje de metal	Resources, Conservation and Recycling	Sverdrup y Ragnarsdottir (2016)	1
	Residuos Electrónicos		Sinha, et al (2017)	2
		Waste Management	Ghisolfi, et al (2017)	3
	Residuos en Cadena de suministro	Simulation Modelling Practice and Theory	Golroudbary y Zahraee (2015)	4
	Reciclaje de residuos especiales	Transportation Research Part A: Policy and Practice	Inghels, et al (2016)	5
	Residuos de construcción	Waste Management	Ding, et al (2016)	6
Energía Renovable	Biomasa	Biomass & Bioenergy	Nasiri, et al (2016)	7
	Biogás	Environmental Innovation and Societal Transitions	Cavicchi, (2016)	8
	Sostenibilidad Biodiesel	Journal of Cleaner Production	Barisa, et al (2015)	9
			Espinoza, et al (2017)	10
	Biocombustibles		Sanches-Pereira y Gomez (2015)	11
		Renewable and Sustainable Energy Reviews	Franco, Zapata y Dyner (2015)	12
	Energías Renovables		Liu, y Zeng, (2017)	13
Agricultura	Agricultura Ecológica	System Engineering Theory and Practice	Wang, (2016)	14
	Sistemas agroalimentarios	Agriculture	Monasterolo, et al (2016)	15
	Producción agrícola		Armendáriz, Armenia, Atzori, (2016)	16
		Ecological Modeling	Walters, et al (2016)	17
		Science of the Total Environment	Chapman y Darby, (2016)	18

	Agricultura sostenible	Sustainability	Turner, et al (2016)a	19
		International Journal of Agricultural Sustainability	Turner, et al (2016)b	20
		Natural Resource Modeling	Turner, et al (2017)	21
		Agricultural Systems	Ha, et al (2017)	22
Emisiones	Mitigación de emisiones de CO2	International Journal of Technology	Hidayatno, Rahman, y Muliadi, (2015)	23
		Clean Technologies and Environmental Policy	Procter, et al (2017)	24
		Energy	Ziemele, et al (2017)	25
		Journal of Cleaner Production	Liu, et al (2015)	26
Agua	Sostenibilidad y agua	Environmental Science and Technology	Walters y Javernick, (2015)	27
		Journal of Cleaner Production	Sun, et al (2017)	28
	Agua y Cambio climático	European Journal of Operational Research	Duran-Encalada, (2017)	29
	Gestión del Agua	Journal - American Water Works Association	Rehan, et al (2015)	30
		Science of the Total Environment	Julius, et al (2016)	31
		Environmental Modelling & Software	Julius, et al (2017)	32
		Water Science and Technology: Water Supply	Qiang, (2016)	33
		Journal of Cleaner Production	Sahin, et al (2017)	34
		Journal of Soil and Water Conservation	Inman, et al (2016)	35

Sostenibilidad en general	Construcción	Journal of Industrial Engineering and Management	Zhou y Liu (2015)	36	
		Energy and Buildings	Marzouk y Azab, (2017)	37	
		Journal of Cleaner Production	Ozcan-Deniz, y Zhu, (2016)	38	
	Industria y Negocios sostenibles	Technological Forecasting and Social Change	de Gooyert, et al (2016)	39	
		International Journal of Production Economics	Sudarto, Takahashi, y Morikawa, (2017)	40	
		Advances in Business Marketing and Purchasing	Shamsuddoha, (2015)	41	
		Organization and Environment	Abdelkafi y Täuscher (2016)	42	
		International Journal of Applied Engineering Research	Imron y Ilhamsah (2016)	43	
		Transporte sostenible	International Journal of Life Cycle Assessment	Onat, et al (2016)	44
			Journal of Engineering Science and Technology	Tan y Yap, (2016)	45
	Cities		Haghshenas, Vaziri y Gholamialam (2015)	46	
	International Journal of Modelling and Simulation		Sayyadi y Awasthi (2017)	47	

Ciudades Sostenibles	Chinese Journal of Applied Ecology	Li, et al (2015)	48
	Environmental Science and Policy	Allington, Li y Brown (2017)	49
	Journal of Cleaner Production	Wan, et al (2017)	50

Aunque los modelos existentes para cada uno de los grupos de temas revisados representan importantes aportes a la evaluación de sostenibilidad, no se encontraron modelos de simulación que involucren el modelado de indicadores de sostenibilidad en la cadena productiva de bioetanol, ni objetivos deseados, como los que se abordan en esta tesis.

Dado anterior, para el desarrollo de esta tesis se planteó una síntesis metodológica para la evaluación de sostenibilidad en la cadena de suministro de bioetanol, presentada en el Capítulo 3.

1.7 Metodología de investigación

A continuación se presenta un resumen de la metodología llevada, basado en la forma de presentación realizada por (Valencia, 2016).

Para lograr el objetivo general esta tesis cuenta con tres objetivos específicos, los cuales permiten ver el alcance de la investigación realizada. De esta forma, para conseguir los objetivos, la metodología se divide en tres grandes etapas, cada una orientada a alcanzar un objetivo específico y los tres en su conjunto al objetivo general.

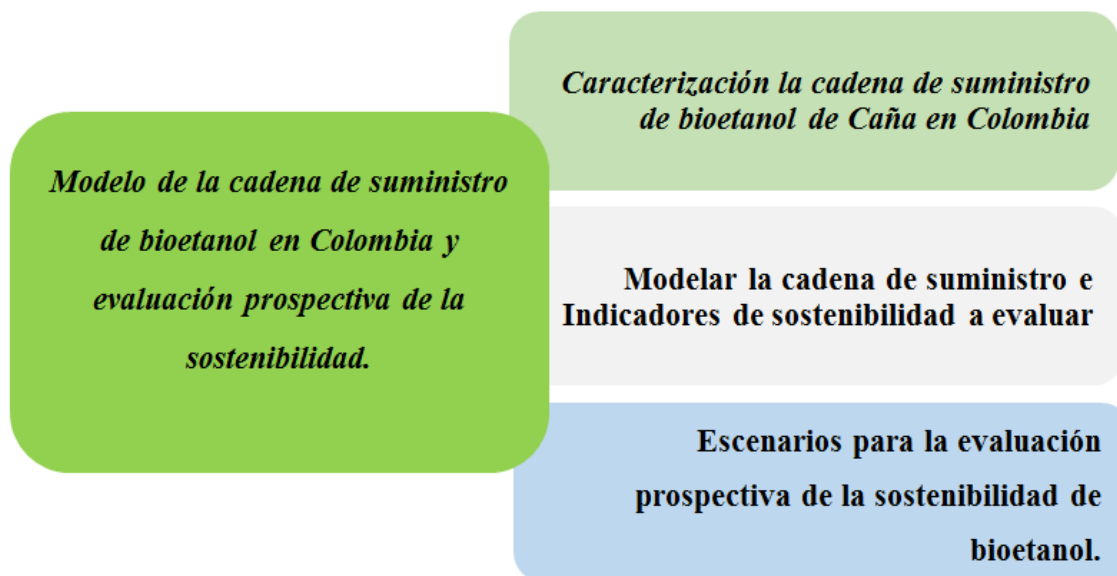


Figura 2. Meta de los Objetivos

La metodología desarrollada, comienza con la revisión del estado del arte para la delimitación del problema, esta revisión se realizó durante todo el desarrollo de la tesis. La revisión comenzó con la situación de la producción de bioetanol de caña en Colombia, teniendo en cuenta políticas, regulaciones, leyes y decretos que incentivan y promueven la producción en Colombia. Así como, estudios previos de evaluación ambiental y de sostenibilidad en otros países en desarrollo, en Latinoamérica y el mundo. Esta revisión permitió definir las herramientas que se han utilizado y cuales se proponen usar para modelar cadenas de suministro y su evaluación de sostenibilidad. En este contexto se realizó la respectiva revisión de aplicaciones Dinámica de Sistemas para la evaluación de sostenibilidad o variables de sostenibilidad presentada en el Capítulo 1.

Para cumplir el primer objetivo, se recurrió a la base de datos de la Federación Nacional de Biocombustibles-Fedebiocombustibles y la Asociación de cultivadores de caña de azúcar de Colombia-Asocaña, para obtener datos, estadísticas e informes técnicos de sector, así como la información asociada a la ubicación geográfica de las plantas de producción de bioetanol.

Para cumplir el segundo objetivo, se desarrolló una síntesis metodológica presentada en el Capítulo 3, donde se propone partir de la metodología de Dinámica de Sistemas para la construcción del modelo de la cadena de suministro, El modelo fue validado y calibrado con la información de la producción del 2006 al 2015, todo el proceso de modelado es presentado en el Capítulo 4. Continuando con el segundo objetivo, se hizo una selección de los indicadores de sostenibilidad que aplican al contexto Colombiano y se seleccionaron los seis indicadores a evaluar, el modelado, simulación y descripción de los indicadores se presenta en el Capítulo 5.

Para cumplir con el objetivo tres, se realizó la discusión sobre las perspectivas metodológicas que plantea Aracil y Gordillo (1997) y Sterman (2000), para el diseño y evaluación de políticas, de igual manera se utilizan los conceptos de restricciones y regiones objetivos del sistema, definidas en Teoría de Viabilidad. En este sentido se propone el marco metodológico del Capítulo 3, y los escenarios de evaluación de sostenibilidad para tres indicadores se presentan en la sección 3.2 y 5.3.

Capítulo 2. Caracterización de la cadena de Suministro de Bioetanol.

En este Capítulo, se describe el marco conceptual y una contextualización del panorama general de los biocombustibles y específicamente del bioetanol de caña de azúcar, de igual manera, se presenta la caracterización de la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar en Colombia, de la forma en que se considera para el modelamiento y la evaluación de sostenibilidad en esta tesis, desde la obtención de las materias primas hasta la mezcla con gasolina, de acuerdo con el mandato legal en Colombia.

2.1 Biocombustibles panorama general.

Dentro del tipo de biocombustibles líquidos que se producen en Colombia se resaltan el biodiesel y el bioetanol. El biodiesel usa como materia prima aceites vegetales para su posterior transesterificación, y el bioetanol, usa como materia prima los jugos con alto contenido de azúcar para su posterior fermentación alcohólica. Dentro de su clasificación se encuentran agrupados en tres grandes tipos: biocombustibles de primera, segunda y tercera generación, denominados así por el origen de su materia prima. Todos pueden ser aditivos o complementos de los combustibles fósiles o pueden ser usados como combustible directamente. Los biocombustibles de primera generación, denominados así debido a que su materia prima proviene generalmente de cultivos agrícolas, principalmente a partir las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares o aceites extraíbles. Ejemplos de estas materias primas son: El jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de la remolacha, almidón de yuca, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuete (Van der Laaka 2007 ; Acheampong et al, 2017). Estos, son producidos empleando tecnología convencional como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas). En Colombia, se produce bioetanol a partir de caña de azúcar y biodiesel a partir de aceite de palma a escala industrial. Siendo un sector agroindustrial muy bien posicionado a nivel nacional e internacional.

Debido a la discusión pública que existe sobre el aumento de impactos ambientales y sociales negativos, y la competencia de la producción de biocombustibles de primera generación con los cultivos para oferta de alimentos, emergen los biocombustibles de segunda generación, estos, son aquellos que provienen de subproductos o residuos de cultivos agrícolas u otras actividades en donde se generan materiales lignocelulósicos, u otros materiales, que al ser potencialmente biodegradables en compuestos menores como azúcares fermentables, podrían ser usados para la obtención de biocombustibles (Charles et al, 2007). Este concepto se basa en los procesos de rompimiento molecular a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno de materia orgánica, permitiendo transformar carbohidratos de alto peso molecular (generalmente sólidos) en carbohidratos e hidrocarburos de bajo peso molecular (líquidos y gases), los cuales poseen un alto poder calorífico que permite su utilización como combustibles (González, 2008). En Colombia, la producción de biocombustibles de segunda generación no ha logrado desarrollarse a una escala industrial y aún es materia de investigación tanto sus diversas materias primas como su rentabilidad y productividad.

En el mismo orden, se encuentran los biocombustibles de tercera generación, los cuales nacen relacionados con la innovación tecnológica y aplicación de biotecnología, en aras de buscar nuevas fuentes de energías renovables que no compitan con espacio ni recursos para cultivos agrícolas alimenticios, y reducir el impacto ambiental. Entre los biocombustibles de tercera generación, se encuentra el biodiesel proveniente de microalgas, las cuales dentro de su metabolismo natural tienen la capacidad de producción y acumulación de lípidos. Esta producción aún se hace a escala laboratorio, sin embargo, las microalgas, presentan ciertas ventajas entre las que se puede resaltar su productividad en espacio, pues al ser un grupo de organismos netamente acuáticos no requieren de tierra para su cultivo, y por tanto no compiten con ningún otro cultivo agrícola por un recurso limitante, como lo es la tierra. Aún si fuera necesario su cultivo sobre la tierra, este podría hacerse en zonas marginales, de ningún o escaso uso alternativo (Xin Meng, et al 2009). Como los de segunda generación, este tipo de biocombustibles se presentan en Colombia aún en fase de investigación y desarrollo a escala laboratorio, y escala piloto.

Como ya se ha mencionado, la industria de biocombustibles más consolidada en Colombia es la de producción de bioetanol de caña de azúcar, el cual se aborda a continuación.

El bioetanol (C_2H_5OH), de primera generación, se produce a escala industrial de manera tradicional, por un proceso que consiste de tres etapas principalmente: Fermentación,

Destilación, y Deshidratación.¹ Esto, a partir de materias primas o mezclas, ricas en azúcares, las cuales se puedan emplear de acuerdo al interés o capacidad de producción y rendimiento de cada materia prima en de los diferentes países productores, como lo muestra la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes y materias primas para obtención de Bioetanol.
Modificado de: (Chauvet y González, 2008).

Fuente de Carbono	Cultivo agrícola	Rendimiento (Litros/Tonelada de cosechado)	Rendimiento (Litros/Hectárea)	Costo de Producción (USD/Litro)	País
Sacarosa	Remolacha (Jugo)	100	7000	0,48	Unión Europea
	Caña (Jugo)	70-85	6000	0,21	Brasil
	Caña (Melaza)	10	590	0,32	India
		10	730	0,23-0,37	México
	Sorgo	56-90	2500-4000		Suecia
Almidón	Maíz	400	3000	0,29-0,37	Estados Unidos
	Trigo	340	2700	0,62	Unión Europea
	Maíz/Trigo paja	285 Litros/ton paja		0,59	Estados Unidos
	Celulosa	Bagazo de caña	55	3850	0,8

2.2 Contexto Colombiano.

En Colombia, desde la aprobación de la Ley 693 de 2001, se marcó la entrada de la nueva era mundial de los combustibles de origen vegetal. Esta ley tuvo como propósito principal la diversificación de la canasta energética colombiana, a través del uso de alternativas compatibles con el desarrollo sostenible en lo ambiental, lo económico y lo social, y dado que, Colombia en particular, es un país que posee las características geográficas y climáticas necesarias para la producción de biocombustibles, extensiones de tierra disponibles para cultivar materias primas, la mano de obra a precios razonables y las condiciones

¹ Tomado y modificado del proceso productivo de alcohol carburante del Ingenio Incausa S.A.

agroclimáticas adecuadas para el desarrollo de una amplia variedad de cultivos utilizados como materias primas, han hecho que este país se convierta en un participante activo con gran potencial para la producción de biocombustibles líquidos (Flórez, 2011), especialmente bioetanol por su tradicional cultivo de caña.

Lo anterior se ha reflejado en el aumento de la producción de bioetanol a nivel nacional en los últimos años, pues se pasó de producir 40 millones de litros en 2005 a más de 450 millones de litros en 2015 (Ver Figura 3). De igual manera, y de acuerdo con Fedesarrollo (2012), la producción de etanol en Colombia se lleva a cabo principalmente en el Valle del río Cauca, centralizado en los departamentos Cauca, Valle, Risaralda y Caldas. En esta región en 2012 existían 218.311 hectáreas sembradas en caña para azúcar, actualmente hay más de 232.000 hectáreas, de las cuales el 25% corresponde a tierras propias de los ingenios y 75% el restante a más de 2.700 cultivadores de caña, siendo lo anterior un factor que permite el intercambio económico y crecimiento de la región.

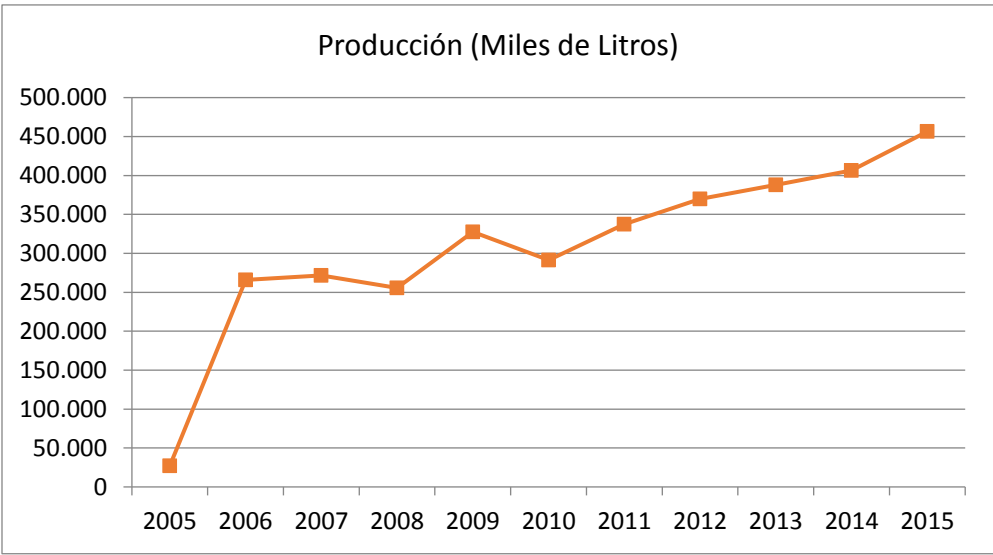


Figura 3. Producción de alcohol carburante.

Modificado de: (Asocaña – Balance azucarero 2012 y 2015).

2.3 La Cadena de Suministro de bioetanol en Colombia.

Como se mencionó la producción de bioetanol en Colombia se encuentra distribuida lo largo de la cuenca del río Cauca en seis ingenios de producción. Estos fueron georreferenciados y se presentan a continuación.

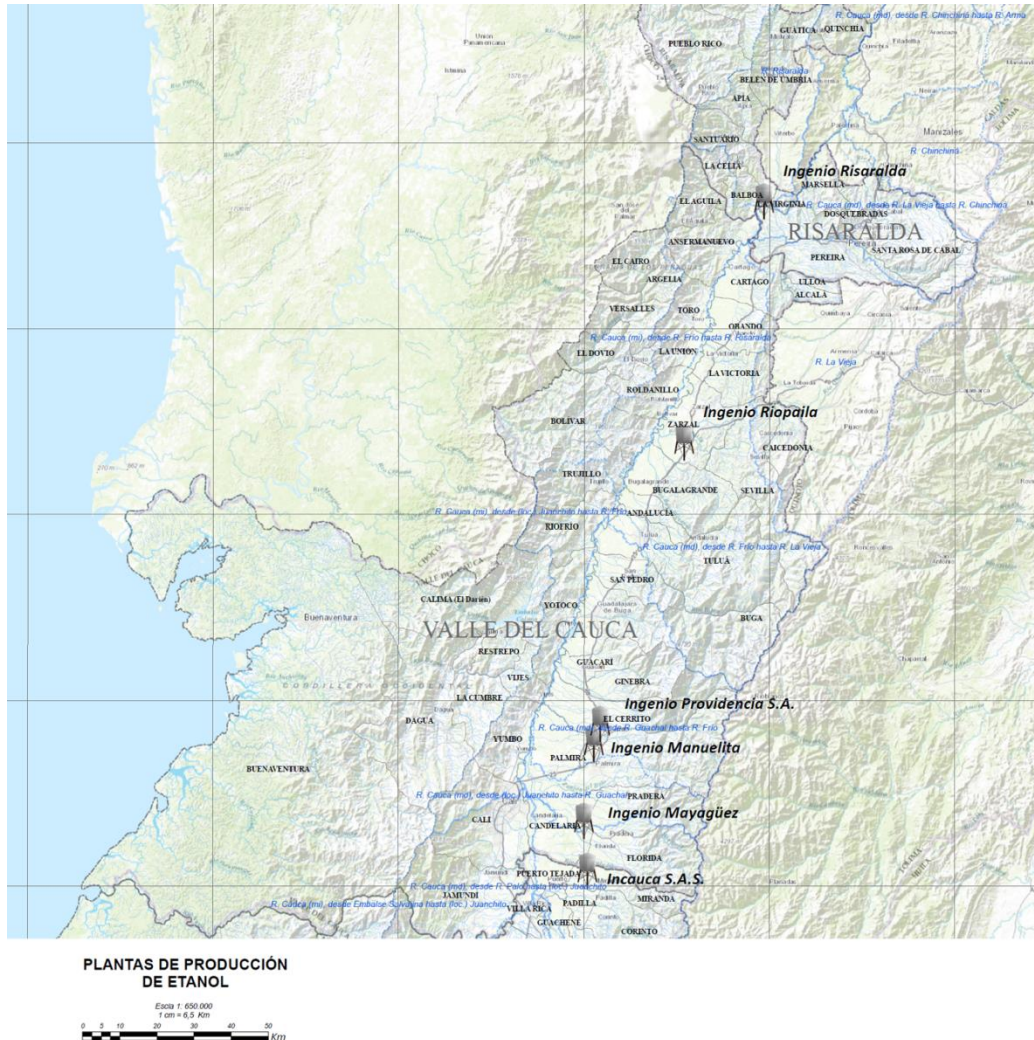


Figura 4. Ubicación geográfica de la producción de bioetanol en Colombia.
Fuente: Elaboración propia. Las plantas de producción se encuentran dentro la cuenca del río Cauca.

El bioetanol en Colombia, se produce a partir de caña de azúcar, siendo esto una característica a favor, debido a que la producción de este cultivo se encuentra consolidada en el país desde el siglo pasado. La caña de azúcar, provee una cantidad de azúcares fermentables que pueden ser extraídos y llevados a fermentación química y posteriormente a procesos de destilación y filtración que permiten obtener el bioetanol o etanol anhidro.

La cadena general como considera en esta tesis se describe en la Figura (5).

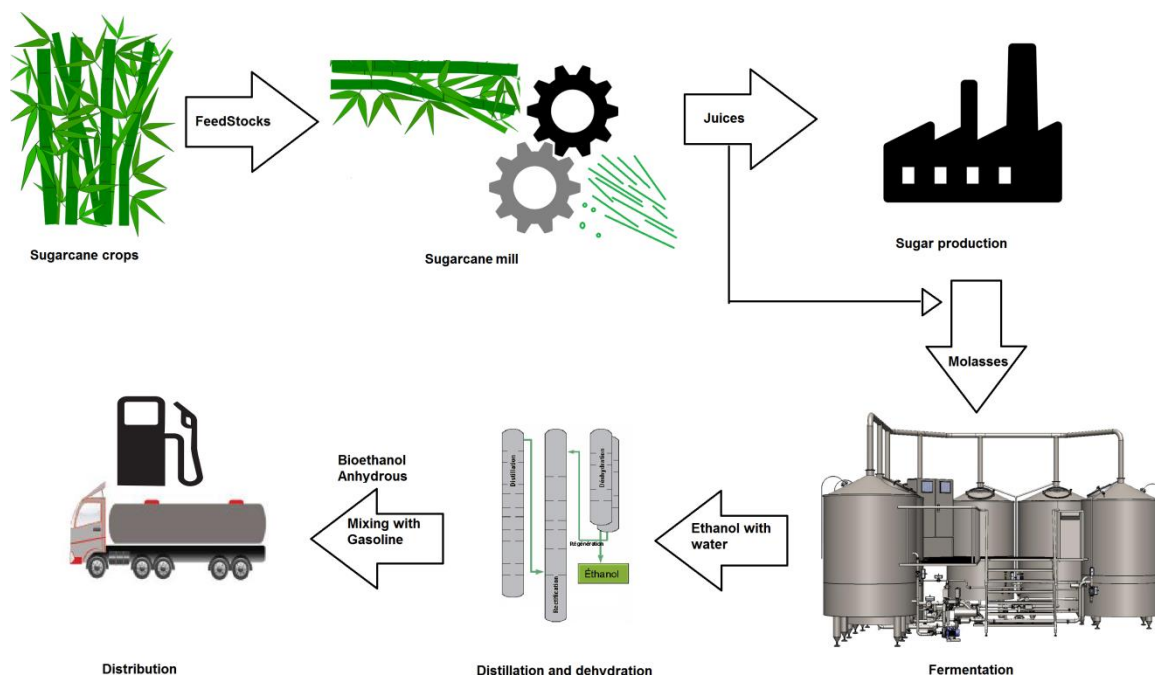


Figura 5. Cadena de Suministro de Bioetanol de Caña.

Fuente: Elaboración propia, basado en (CUE, 2012)

2.3.1 La materia prima

La cadena de suministro, comienza con el cultivo de la caña de azúcar. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), es una planta gramínea C4, capaz de convertir hasta uno por ciento (1 %) de la energía solar incidente en biomasa (Glyn, 2007).

El sistema de cultivo de caña de azúcar más común es el cultivo de fila, ya sea en planicies o en colinas. Este requiere de riego bien distribuido en su periodo vegetativo (Ellis y Merry, 2007). A medida que avanza la maduración, los azúcares simples (monosacáridos, es decir Fructosa y glucosa) se convierten en azúcar de caña (sacarosa, un disacárido). Después de la fase de maduración de 11 a 13 meses después de la siembra, la caña de azúcar puede ser recolectada, para su uso agroindustrial (CUE, 2012).

Una vez cosechada la caña de azúcar, se procede a la extracción del jugo a través de la molienda

Figura 6. Cadena de Suministro de bioetanol de caña.

mecanizada, este

proceso obtiene el jugo que servirá de materia prima para la obtención de bioetanol y un bagazo de caña, el cual es procesado como residuo orgánico cogenerador de energía eléctrica para el proceso productivo (CUE, 2012).

2.3.2 El Proceso productivo.

El bioetanol se fabrica mediante un proceso biotecnológico (Figura 6), en donde una de las principales etapas es la de fermentación alcohólica, la cual consiste en convertir los azúcares presentes en el jugo de la materia prima (En este caso caña de azúcar) que vienen de la extracción, en etanol y gas carbónico, por medio de la acción de levaduras, que realizan esta transformación por medio de su metabolismo natural.

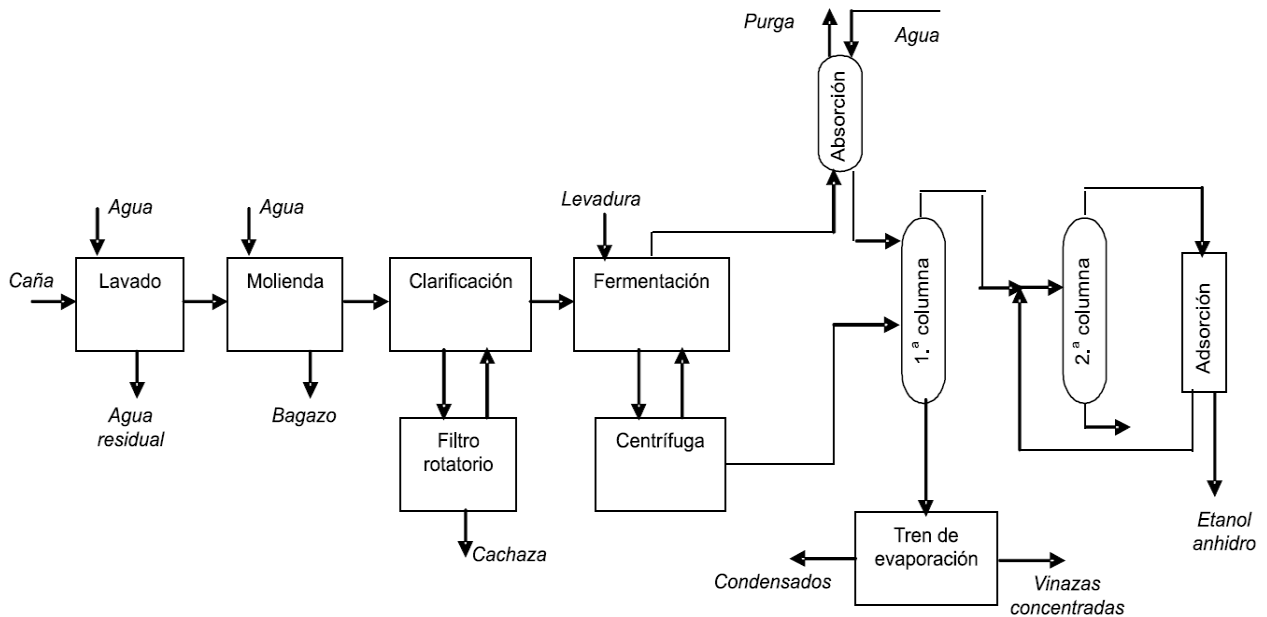


Figura 6. Etapas del proceso productivo de bioetanol. Fuente (Sanchez, 2008).

La fermentación, se desarrolla por medio de un proceso continuo en reactores donde se llevan a cabo las reacciones químicas de transformación de azúcar en etanol y gas carbónico. A la salida de estos reactores, se obtiene un producto conocido como mosto o vino fermentado, que contiene una concentración de alcohol, contiene agua, sólidos y levadura residual. Todo esto debe retirarse del mosto fermentado, para ello, se envía a una columna de destilación del mosto donde se obtienen dos productos: Por la parte superior se obtienen gases y vapor con una concentración de alcohol entre el 40-50 % v/v que se envían a la segunda columna llamada rectificadora. Por la parte inferior se obtiene una corriente líquida llamada vinaza. En la destilación se purifica el mosto fermentado para obtener alcohol con una mayor pureza que podría llegar a ser del 96 %-99 % (v/v). La destilación es un proceso de separación por diferencias en los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla, que al ser

sometidos al calor, los compuestos más volátiles como el alcohol se evaporan y se concentran en fase de vapor.

Posteriormente viene el proceso de deshidratación. Donde, el alcohol purificado en la destilación el cual puede contener entre un 96% v/v de etanol y 4% v/v de agua.

Para que este alcohol pueda ser usado como combustible, es necesario retirarle más agua. La deshidratación tiene lugar en los tamices moleculares, que por medio de una resina sintética retiene el agua contenida en el alcohol rectificado, para obtener como producto alcohol deshidratado con una concentración mínima de 99.5 % de etanol, cumpliendo con las especificaciones para su uso como alcohol carburante. El alcohol deshidratado o alcohol anhidro se condensa y enfría para ser almacenado.

2.3.3 Uso y Mezcla de Bioetanol en Colombia

Las políticas del gobierno colombiano están orientadas a que la producción de bioetanol sigan en crecimiento, teniendo en cuenta el alto potencial que tiene el país para esto. De acuerdo con el Decreto 1135 de 2009, a partir del 1o de enero del año 2012 los vehículos automotores hasta 2000 cm³ de cilindrada que se fabriquen, ensambren, importen, distribuyan y comercialicen en el país y que requieran para su funcionamiento gasolinas, deberán estar acondicionados para que sus motores funcionen con sistema Flex-fuel (E85), es decir, que puedan funcionar normalmente utilizando indistintamente gasolinas básicas o mezclas compuestas por gasolina básica de origen fósil con al menos 85 % de alcohol carburante. Sin embargo, desde el año 2005 la gasolina que se usa en las principales ciudades del país comenzó a denominarse B10, esto quiere decir un combustible con 10 % de Bioetanol y 90 % de Gasolina, pese a este mandato del gobierno, hubo la necesidad de reducir el porcentaje a B8 ya que la producción no alcanza para el suministro nacional (Ver Figura 6). Actualmente todos los departamentos del país cuentan con combustible B8, a excepción del Departamento de la Guajira, Norte de Santander y Arauca, quienes cuentan con combustible importado de Venezuela o subsidiado por el gobierno nacional.

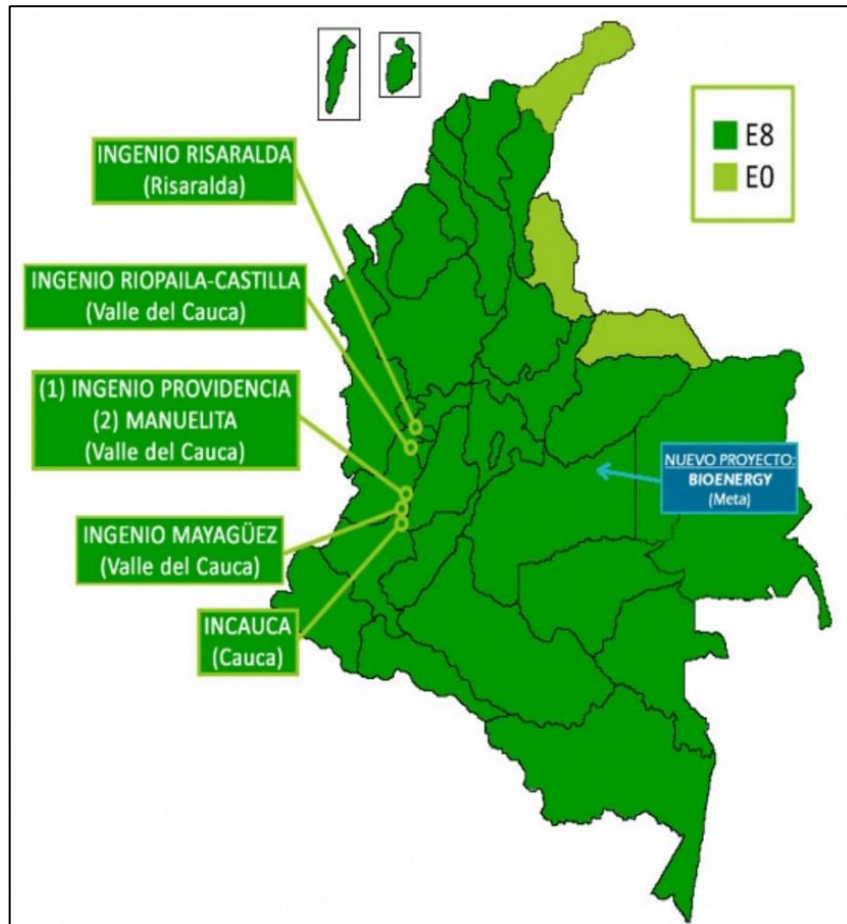


Figura 7. Porcentaje de Mezcla de Bioetanol en Colombia.

Fuente: (FedeBiocombustibles 2016).

En Colombia, en el año 2015, se produjeron 456 millones de litros de alcohol carburante o bioetanol, destinados a la mezcla con gasolina en una proporción E8 (8% etanol, 92% gasolina), de acuerdo con el mandato de oxigenación establecido por el gobierno (Asocaña, 2016). De esta manera se evidencia el aumento en la producción de litros/año en más de diez veces con relación a la producción inicial reportada en 2005. En el mismo comportamiento se encuentra la capacidad instalada del país para su producción, pues desde 2011 al 2015 el país contó con una capacidad instalada de 1'250.000 litros/día. Lo cual perfectamente con una operación de 335 días podría alcanzar a los 420 millones de litros/año, ubicándolo como uno de los tres principales productores de bioetanol en América Latina. En 2016 esta capacidad instalada aumentó a 1'650.000 litros día. (Ver Tabla 2)

Dentro de las proyecciones del gobierno, está planeada una expansión significativa con más de 5 millones de hectáreas de tierra potencialmente disponibles para el cultivo de agricultura

energética. Consecuentemente, el Gobierno de Colombia ha aprobado directrices de mezclas para para etanol (E10) con la opción de incrementar la proporción de mezcla hasta E20. Además, las exportaciones de biocombustibles a Estados Unidos y la Unión Europea, bajo los Tratados de Libre Comercio, representan una enorme oportunidad y reto (CUE 2012).

Tabla 3. Capacidad instalada de bioetanol en Colombia.

Fuente: Modificado de Fedebiocombustibles (2016).

Departamento/Ingenio	Área Sembrada (ha)	Capacidad Instalada		Empleos Industriales	Empleos en la cadena
		Molienda de caña de azúcar (T/día)	Etanol (Litros/día)		
Cauca-INCAUCA	24.630	14.000	350.000	987	27.636
Valle-Riopaila, Providencia, Manuelita, Mayagüez	100.153	28.000	1'200.000	2121	59.388
Risaralda-Ingenio Risaralda	2.886	5.000	100.000	476	13.328
Caldas	3.304				
Meta-Bioenergy [Proyección a 480.000 L/día]					
Total	130.973	47.000	1'650.000	3.584	100.352

Para este trabajo se plantea hacer un modelamiento de la sostenibilidad de una cadena de suministro teórica de bioetanol de caña de azúcar en Colombia como se propone en la Figura (7).

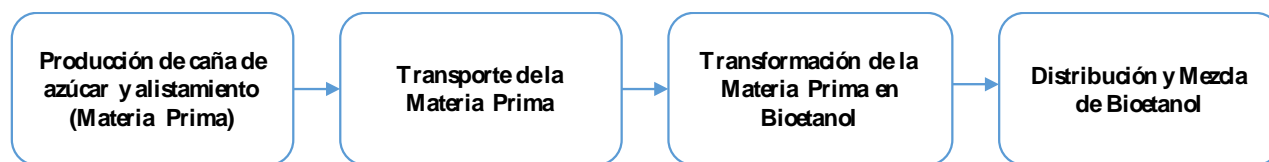


Figura 8. Límite de la Cadena de Suministro de Bioetanol de caña

2.4 Sostenibilidad de Biocombustibles panorama general.

La producción sostenible de biocombustibles a partir de distintas materias primas ha tomado una mayor relevancia en el panorama del sector energético mundial, esto debido a que no existe un consenso sobre cuáles son las mejores estrategias y programas que deben ejecutarse para implementar, evaluar y monitorear el desarrollo sostenible en este sector. A continuación se presentan algunas investigaciones de alto impacto a nivel internacional en las que se consideró la vinculación de pilares de la sostenibilidad en la producción de biocombustibles.

Markevicius et al, (2010) realizó una investigación sobre las tendencias y criterios para la sostenibilidad en la producción de biocombustibles líquidos, allí describió una aproximación de 35 criterios generales a tener en cuenta en la sostenibilidad. Concluye claramente que la medición de la sostenibilidad de biocombustibles y biomasa para energía es un campo difícil, debido a los tres grandes aspectos que se deben tener en cuenta y a su vez las subcategorías que tiene cada uno de estos aspectos, y que este tema debe ser de investigación permanente debido a las dinámicas de producción.

Puntualmente para evaluar la sostenibilidad en la producción de bioetanol, se han empleado distintas metodologías en diferentes países. Foteinis, Kouloumpis y Tsoutsos en (2011) emplearon el Análisis de Ciclo de vida para la producción de bioetanol de remolacha azucarera en Grecia, sin embargo, solo se enfocaron en los Gases de Efecto Invernadero del proceso productivo, empleando información del panel intergubernamental de cambio climático.

En el mismo sector pero con otra materia prima, Walter et al, (2011) evaluaron tres aspectos de la sostenibilidad de la producción de bioetanol de caña de azúcar en Brasil, teniendo en cuenta información secundaria. Estos aspectos fueron emisiones de GEI, cambio directo de uso del suelo y aspectos socio-económicos. La conclusión general es que una parte significativa de producción de etanol en Brasil puede considerarse sostenible, pero es necesario realizar evaluaciones periódicas y definir unos tiempos de evaluación hacia el futuro.

Con respecto al uso de indicadores para la evaluación de la sostenibilidad, ante de los propuestos por GBEP, Diaz- Chávez (2011) planteó un panorama sobre para el sector de los biocombustibles y propuso un conjunto de indicadores que vinculan los aspectos

ambientales, sociales y económicos y su relación con las políticas e instituciones, Como lo muestra la Figura (8). Estos presentan una amplia similitud por los que se usarán en esta tesis.

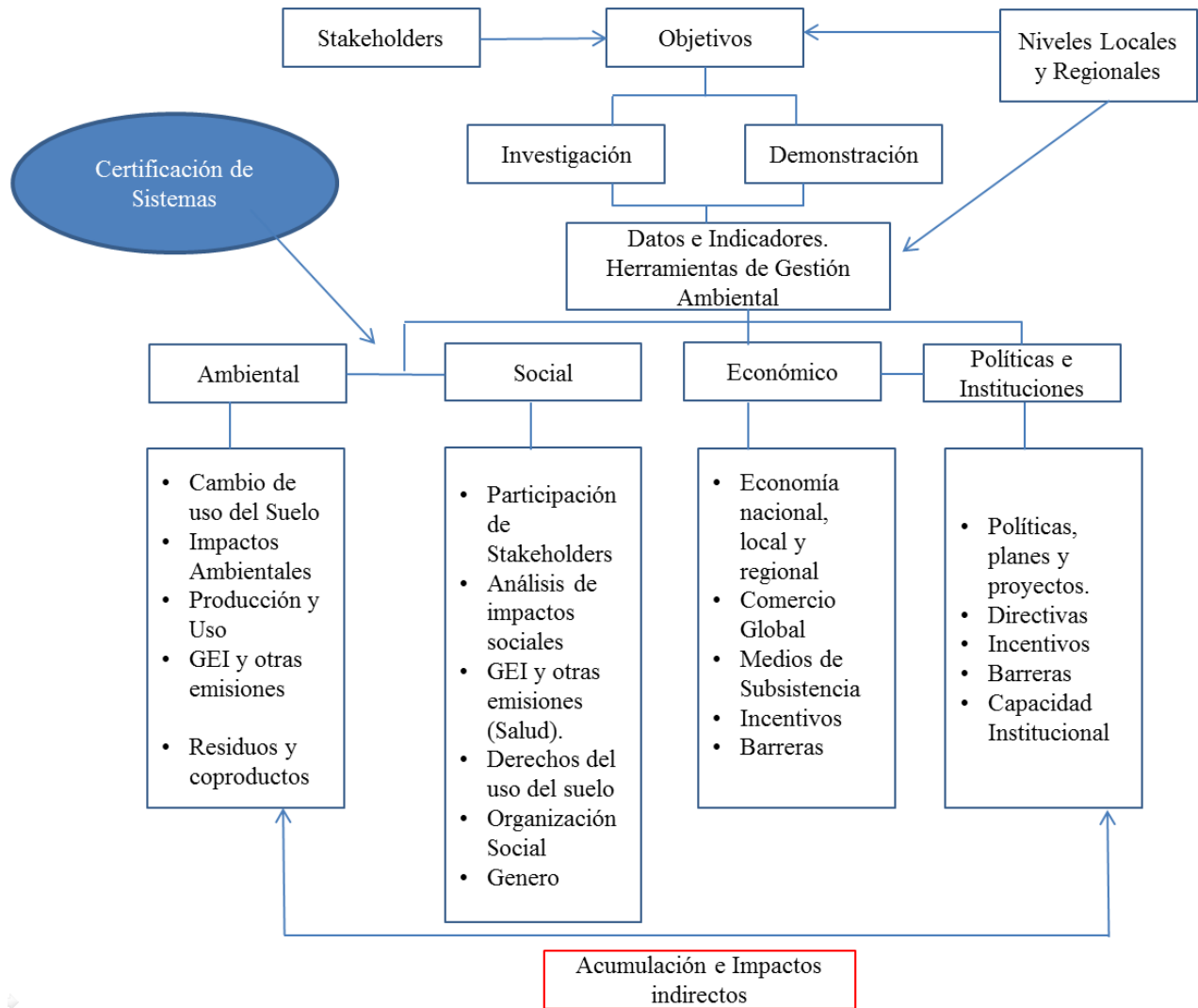


Figura 9. Indicadores Ambientales, Sociales y Económicos.

Fuente: (Díaz- Chávez 2011).

De otro lado, con relación a la evaluación de aspectos sociales de la producción de bioetanol, Esteves (2013) Discutió sobre la literatura de evaluación social de la producción de bioetanol y planteó que era necesario seguir trabajando en la formulación de criterios e indicadores sociales para una evaluación integral de sostenibilidad de este biocombustible. Así mismo, especificó que los formuladores de políticas necesitan de interiorizar la dimensión social en la producción de bioetanol en la toma de decisiones para evitar la oposición pública y los costos sociales irreversibles en el futuro.

Para la integración de aspectos económicos y sociales, en la producción de bioetanol Herreras (et al 2013) desarrollaron un modelo Input-Output en el que interconecta tres regiones de Brasil para evaluar tres escenarios a 2020 y así demostró que el impacto social y económico puede ser positivo en ingresos y empleos, con el incremento de la producción de bioetanol de caña de azúcar en una región noreste Brasil.

De igual manera, para la integración tanto de los aspectos económicos y sociales cómo de los ambientales Mangoyana, smith y Simpson (2013) proponen un marco conceptual holístico sobre indicadores que se deben tener en cuenta para evaluar y monitorear la sostenibilidad de los sistemas de producción de biocombustibles, a partir de este, discute que es necesario tener en cuenta cada uno de los subsistemas que se pueden generar a partir de cada indicador, así mismo, remarca que es necesario desarrollar el pensamiento sistémico para la vinculación de todos los aspectos de la sostenibilidad. Sin embargo, no es claro como lo deben hacer los países en sus mercados nacionales.

Evidentemente hay una línea de tendencia con respecto a la discusión sobre las formas, metodologías y filosofía que se deben tener en cuenta para la evaluación de sostenibilidad de bioetanol de caña y otros biocombustibles de diferentes materias primas. A continuación se presenta el consenso mundial sobre la producción de bioenergía en materia de sostenibilidad, los indicadores GBEP.

2.5 Indicadores GBEP

La Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP) ha desarrollado un conjunto veinticuatro indicadores para la evaluación y monitoreo de la sostenibilidad de la bioenergía a niveles nacionales. Los indicadores GBEP pretenden informar a los responsables de formular políticas en los países, sobre los aspectos ambientales, sociales y económicos del sector de la bioenergía en sus países, así como guiarlos hacia políticas que fomenten el desarrollo sostenible.

Tabla 4. : Indicadores de Sostenibilidad del GBEP.
Fuente: (GBEP, 2011).

Indicadores Ambientales	Indicadores Sociales	Indicadores Económicos
--------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

1. Ciclo de vida de los Gases de Efecto Invernadero	9. Asignación y tenencia de la tierra para nueva producción de bioenergía	17. Productividad
2. Calidad del suelo	10. Precio y oferta de una canasta alimentaria nacional	18. Balance neto de bioenergía
3. Niveles de cosecha de recursos madereros	11. Cambio en ingresos	19. Valor añadido bruto
4. Emisiones de contaminantes del aire que no son GEI (Contaminantes criterio)	12. Empleos en el sector de la bioenergía	20. Cambio en el consumo de combustibles fósiles y en el uso tradicional de la biomasa
5. Uso y eficiencia del agua	13. Cambio en tiempo no pagado invertido por mujeres y niños en la recolección de biomasa	21. Formación y recualificación de los trabajadores
6. Calidad del agua	14. Bioenergía usada para ampliar el acceso a servicios modernos de energía	22. Diversidad energética
7. Diversidad biológica en el paisaje natural	15. Cambio en la mortalidad y tasas de enfermedades atribuibles a humos en espacios cerrados	23. Infraestructura y logística para la distribución de bioenergía
8. Uso de la tierra y cambio de uso de la tierra relacionados con la producción de materia prima para bioenergía	16. Incidencia de lesiones, enfermedades y muertes laborales	24. Capacidad y flexibilidad del uso de la bioenergía

Estos indicadores están basados en los tres pilares de la sostenibilidad; sostenibilidad económica, social y ambiental. Los indicadores del GBEP se enfocan en un nivel nacional y/o regional del mercado, así como en todo el ciclo de vida del biocombustible (Hayashi y Ireland, Zhu 2014).

2.5.1 GBEP y la aplicación para el Bioetanol en Colombia.

Para realizar un análisis de la aplicación de los indicadores GBEP en Colombia, se tomó una cadena de suministro general del bioetanol que se produce a partir de caña de azúcar. Para esta delimitación se partió desde la extracción de materia prima hasta la mezcla del bioetanol con la gasolina, como muestra la Figura 10.

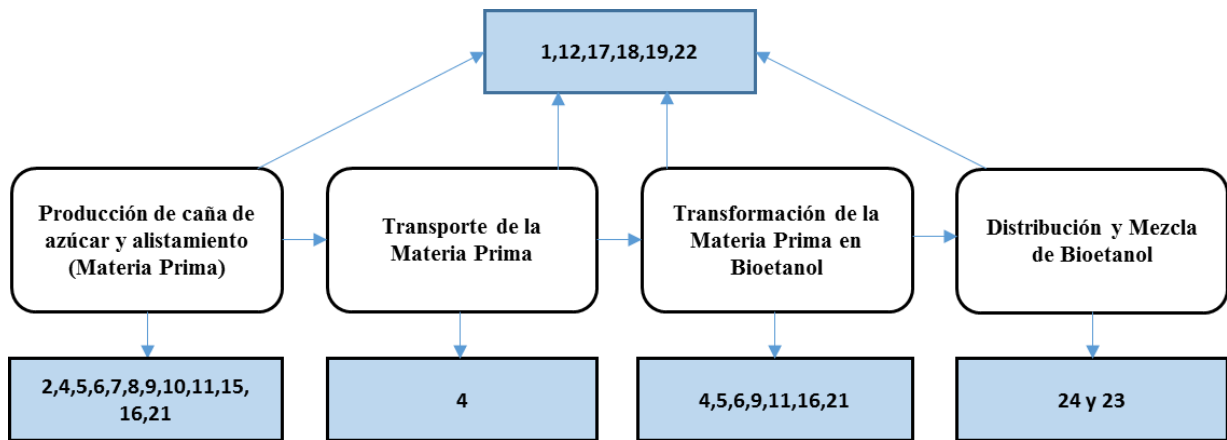


Figura 10. Aplicación de los indicadores GBEP en la Cadena de suministro del Bioetanol en Colombia.

Nota: Los números de las cajas de color azul inferiores y superiores hacen referencia a los indicadores presentados en la Tabla 3.

En la Figura (10) se muestran 4 fases del proceso de producción de bioetanol. La primera es la producción de la materia prima, el cual incluye la siembra y el cultivo de caña, así como el alistamiento que conlleva quema de cultivo. La segunda fase es el transporte de la materia prima, el cual se lleva a cabo transportando la caña de azúcar obtenida en el cultivo, hasta la fábrica donde será transformada. La tercera fase es toda la transformación física y bioquímica, es decir la molienda para extracción del jugo, la fermentación, destilación y purificación para la obtención de bioetanol. Finalmente la cuarta fase es la distribución del bioetanol obtenido al lugar donde será mezclado con la gasolina o a estaciones de bombeo y transporte del producto.

- Conclusiones de capítulo 2.

Nuestro país actualmente tiene una capacidad instalada de 1.650.000 Litros/día centralizado en los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda. Sin embargo, la producción real se estima en un 85% de esta capacidad, a esto se le suma el incremento de la demanda de gasolina nacional ya sea por el cierre fronterizo o por incremento del parque automotor, lo cual hace obligatorio para la satisfacción de la demanda interna la importación de un porcentaje de etanol que permita cubrir esta diferencia de la demanda con la producción. Esto evidencia la necesidad que tiene el país para seguir incrementando la capacidad instalada de producción de bioetanol.

Si bien es cierto que es necesaria la importación, también es cierto que Colombia restringió la importación de etanol solo para escenarios que se requiera cubrir el déficit de la oferta

nacional, con el fin de incentivar al país a lograr la autosuficiencia energética, el abastecimiento interno del biocombustible y la protección de la Agroindustria Colombiana.

Como principal conclusión se tiene que es imperativa la puesta en marcha de un programa de sostenibilidad de producción de biocombustibles en Colombia, ya sea un esquema de certificación o evaluación y seguimiento de los indicadores GBEP. Dado esto se requieren de herramientas que permitan la evaluación de la sostenibilidad en diferentes tiempos y periodos de evaluación, es decir una evaluación prospectiva. Una de estas herramientas es la Metodología de dinámica de sistemas por medio de la cual se pueden capturar hipótesis como la mostrada en este capítulo. Sin embargo, se debe ir más allá, se debe identificar los indicadores de sostenibilidad que apliquen para cada contexto y realizar el modelamiento y simulación de distintos escenarios, con el fin de evaluar la sostenibilidad. De esta forma en el siguiente capítulo se presenta la síntesis metodológica propuesta para la evaluación de sostenibilidad en la producción de bioetanol.

Capítulo 3. Síntesis Metodológica para la evaluación de sostenibilidad

Como se discutió en el Capítulo 1, la evaluación de sostenibilidad se ha realizado con un enfoque de ciclo de vida, es decir, donde se consideran las etapas desde el cultivo de materias primas hasta la producción, distribución y uso del combustible (Mata, 2011). En este documento, manteniendo la tendencia de las referencias, la cadena de suministro del producto también es representada como una fracción de su ciclo de vida.

Ahora, las cadenas de suministro tienen naturaleza dinámica y compleja, por lo que el modelamiento se convierte en el instrumento natural para el análisis y gestión de las cadenas de suministro (Tako y Robinson, 2012; Verbraeck y Van Houten 2005).

Comúnmente, las cadenas de suministro han sido representadas con la metodología de la Dinámica de Sistemas (forrester, 1961; Aracil, 1997; Sterman, 2000), que es una metodología de representación sistémica que se basa en el establecimiento de relaciones causales entre atributos del sistema representado, para la obtención de las variables de estado, razones de cambio, variables auxiliares y parámetros del modelo matemático que representaría el sistema.

La aplicación de la Dinámica de sistemas se ha venido utilizando cada vez con mayor frecuencia para la evaluación de la sostenibilidad en diferentes sectores (Nabavi, et al 2017, Zhang, et al 2017, Dacea, et al 2015, Banos-Gonzalez, 2015). También se ha utilizado para la evaluación de sostenibilidad en el sector de biocombustibles (Musango, et al 2012, Robalino, et al 2014, Espinoza et al 2017, Demczuk & Padula, 2017), porque permite observar la evolución temporal del sistema y las consecuencias de la inclusión de políticas y/o estrategias para la gestión de la cadena de suministro.

Ahora bien, dado que se requiere conocer si los indicadores de sostenibilidad, evolucionan hacia estados y regiones deseadas y si al hacerlo cumple con los objetivos de sostenibilidad, en esta síntesis metodológica, también se involucran las ideas de oportunidad, necesidad y adaptación, desarrolladas en el contexto de la Teoría de la Viabilidad.

A continuación se presentan los conceptos generales de Dinámica de Sistemas y Teoría de Viabilidad y la manera como se involucran en la evaluación prospectiva de sostenibilidad.

3.1 Construcción de Modelos de Simulación con Dinámica de Sistemas.

La Dinámica de Sistemas es una metodología de modelamiento sistémico y determinista que da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias dependientes del tiempo, partiendo de la representación de las relaciones de causalidad del sistema.

La metodología específica de modelado con Dinámica de Sistemas cuenta con dos versiones altamente reconocidas, propuestas por dos de sus más importantes representantes: Javier Aracil de la Universidad de Sevilla y John Sterman del MIT.

En Aracil y Gordillo (1997) se plantea que la metodología de modelamiento de la Dinámica de Sistemas consta de tres fases: conceptualización, formulación del modelo y evaluación del modelo.

Por su parte, Sterman (2000) plantea que la metodología de modelamiento de la Dinámica de sistemas cuenta con cinco pasos: articulación del problema, formulación de la hipótesis dinámica, formulación de un modelo de simulación, prueba, diseño y evaluación de políticas.

Como se muestra en la Figura (11), las versiones de estos dos autores son análogas y pueden ser utilizadas indistintamente en el proceso de modelado.

A continuación se explican brevemente las fases de modelado a aplicar en esta investigación:

La fase de *Articulación del problema* consiste en tratar de comprender y estar inmerso en el problema que se va a estudiar, aquí es necesario lo que normalmente se hace en el método científico como revisión del estado del arte. Esto permite tener una visión más clara de lo que vamos a modelar, de tal manera que se puedan identificar algunas partes del sistema de interés y sus interrelaciones, lo cual nos llevará a construir un diagrama causal con estructuras de realimentación y definición del límite del sistema bajo una hipótesis inicial conocida como la *Formulación de la Hipótesis dinámica*.

Aracil y Gordillo (1997).

Sterman (2000).

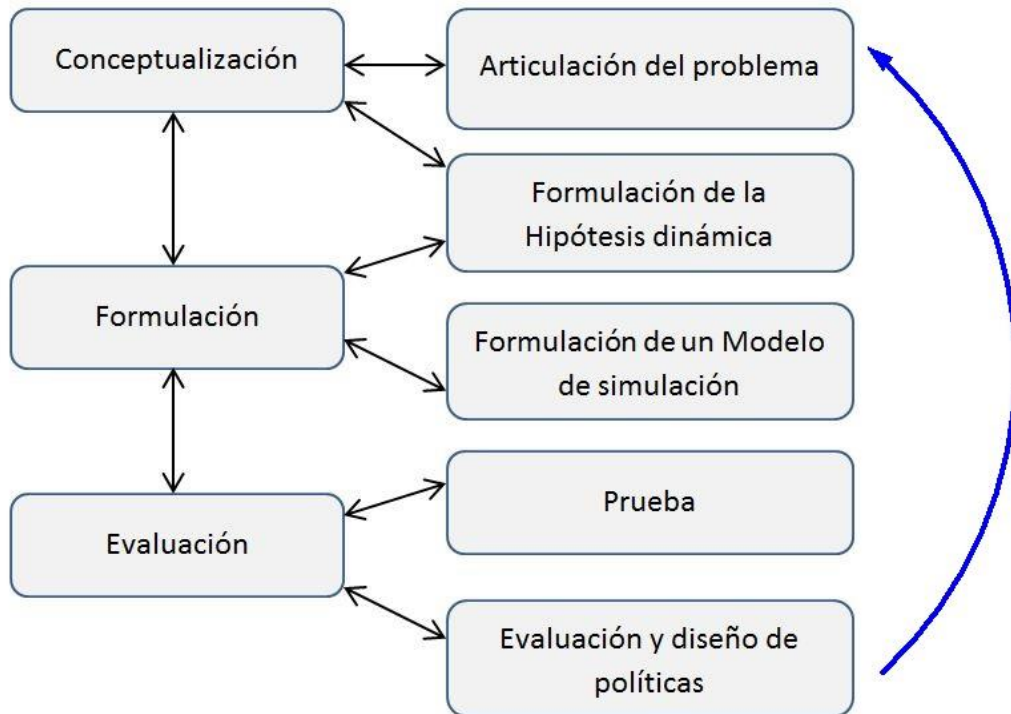


Figura 11. Comparación entre las etapas del modelado con Dinámica de Sistemas.

Fuente: Aracil y Gordillo (1997) y Sterman (2000).

Con esta *Hipótesis dinámica* y el diagrama causal construido y las partes del sistema de interés identificadas, se pasa a la fase de *Formulación*, aquí se parte de una transformación de este diagrama, en el lenguaje formal que se utiliza en Dinámica de Sistemas que es el diagrama de Niveles y Flujos, a partir del cual podemos construir el modelo matemático que representará el sistema. Posteriormente estas ecuaciones las podemos introducir en el software de simulación, junto con la asignación de los parámetros y condiciones iniciales del modelo. Para esta tesis se va a usar el software de simulación Vensim Ple y Vensim Ple Plus.

Después de haber introducido el modelo matemático en el software de simulación, se pasa a la fase de *Evaluación* donde se procede a realizar las *Pruebas* del modelo, las cuales permiten evaluar a través del comportamiento gráfico de las variables, si existe una relación coherente entre las hipótesis inicial y el modelo formulado. Esto con el fin de saber si el modelo es potencialmente útil. Continuando con la evaluación es importante determinar la sensibilidad del modelo, con relación a la variación de los parámetros que están en el modelo. Una vez

evaluada la coherencia del modelo se estudia el comportamiento prospectivo bajo el gobierno de políticas y estrategias planteadas, esto permite la *Evaluación y diseño de políticas*.

3.2 Oportunidad, necesidad y adaptación

La evolución de cualquier sistema productivo debe ser consistente con las limitaciones y las metas u objetivos que debe alcanzar en un tiempo finito o prescrito. Sin embargo, no hay razón por la cual el sistema deba cumplir con los objetivos que se le han impuesto bajo las limitaciones internas o externas que deba enfrentar. Esto nos lleva al estudio de cómo corregir la dinámica y/o las restricciones del sistema para restablecer su viabilidad. En este ambiente emerge la Teoría de la Viabilidad.

La Teoría de la Viabilidad diseña y desarrolla métodos matemáticos y algorítmicos para investigar la adaptación a las restricciones de viabilidad de las evoluciones gobernadas por sistemas complejos bajo incertidumbre (Aubin et. al., 2011). El propósito de la Teoría de la Viabilidad es intentar responder directamente a la cuestión de la adaptación dinámica de sistemas evolutivos inciertos a entornos definidos por restricciones (Aubin et.al., 2011).

Tres conceptos son centrales en el discurso de la Teoría de la Viabilidad: oportunidad, necesidad y adaptación. La oportunidad es una selección $x'(t)$ (campo vectorial) entre las posibilidades dadas por un motor de evolución del sistema $F(x(t))$ (el conjunto de todas las inclusiones diferenciales del sistema evolutivo que rige el comportamiento del sistema) y la necesidad es una condición K sobre los estados del sistema $x(t)$, es decir:

$$x'(t) \in F(x(t)) \quad x(t) \in K \quad (1)$$

La razón de la inclusión del concepto de oportunidad se justifica en el hecho de que para cumplir con los objetivos de producción y/o sostenibilidad que se ha trazado el sistema productivo, debe realizar una selección entre las posibilidades dadas por la estructura de la cadena de suministro y las externalidades a las que está sometido, mientras que, el concepto necesidad se incluye porque cualquier evolución del sistema no necesariamente cumple con las metas deseadas desde las diferentes perspectivas empresariales y de sostenibilidad. Se necesita que el estado del sistema cumpla con una serie de restricciones que garanticen la continuidad del negocio y los objetivos de sostenibilidad (Aubin, 2011).

Por su parte, el concepto adaptación es importante, porque la constitución sistémica de cualquier sector productivo, inclusive el de los biocombustibles, ocurre como una respuesta

adaptativa del sector para mantenerse en el mercado. La adaptación es la respuesta directa de los sistemas a los conceptos mencionados: cambio y necesidad (Aubin, 2011).

En este orden de ideas, para evaluación de sostenibilidad se requiere una metodología que represente los sistemas y que permita el estudio de oportunidad y de la necesidad, y que a su vez muestre comportamientos emergentes que evidencien la existencia de adaptación.

3.3 Evaluación Prospectiva

A partir de la representación sistémica y matemática que se consigue con la Metodología de la Dinámica de Sistemas, es posible realizar diferentes tipos de análisis de las órbitas del sistema. Por ejemplo, podría realizarse un estudio de los conjuntos invariantes del sistema y de los cambios que estos conjuntos pudieran tener por la variación de parámetros, lo cual se realiza desde la Teoría de los Sistemas Dinámicos No Lineales. Pero el propósito, en este documento, es conocer cómo evolucionan las órbitas para periodos de tiempo próximos, es decir, el estudio del comportamiento transitorio y, si cuando evolucionan, lo hacen satisfaciendo los objetivos del sistema (región deseada), se encuentran cerca de lograrlos (región de alerta) o la evolución no se dirige hacia los objetivos impuestos (región no deseada).

Para saber si el sistema evoluciona por regiones deseadas que se corresponden con los objetivos del sector y con los objetivos de sostenibilidad, se ha utilizado la Teoría de Viabilidad (Aubin, 2011).

De esta forma, la propuesta metodológica que se realiza, busca establecer si los estados futuros del sistema productivo, es decir sus indicadores, se encuentran en estados deseados. A esto lo denominaremos: la evaluación prospectiva de indicadores de sostenibilidad.

El desarrollo de la metodología que se propone para la realización de la evaluación prospectiva de indicadores de sostenibilidad, inicia con la presentación de los siguientes elementos:

- **Estado inicial del sistema o línea base $x(t_0)$.** El estado inicial es el estado que describe la condición primera del sistema. Si $x(t)$ es el vector que representa el estado del sistema para cualquier tiempo t , entonces el estado inicial se representa como $x(t_0) \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, donde Ω es el espacio de todos los estados posibles que podría alcanzar el sistema.

- **Tiempo de evaluación t_e .** Es el momento en el que se realizará la evaluación de los indicadores del sistema, entonces, se espera que si $t = t_0$ define el tiempo del estado inicial del sistema, el tiempo de evaluación $t_E \in \mathbb{R}^+$ sea mayor al tiempo del estado inicial t_0 , es decir, $t_e > t_0$. Note que si $t_e \geq t_0$, entonces no sería prospectiva para el caso $t_e = t_0$.
- **Escenarios tendenciales A_i .** Los escenarios tendenciales A_i son particiones del espacio de estados de la forma $A_i = \{x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n: a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n\}$, que satisfacen dos condiciones: 1) la intersección de los escenarios es vacía ($A_i \cap A_j = \phi$) y 2) la unión de los escenarios es el espacio de estados posibles para la aplicación ($\cup A_i = \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$).

Para la evaluación de la sostenibilidad en el sector biocombustibles se han definido los siguientes tres escenarios:

1. Escenario Deseado A_D
2. Escenario de Alerta A_A
3. Escenario no Deseado A_N

Diremos que el sistema tiene los valores deseados para el tiempo de evaluación t_e , cuando para el tiempo de evaluación y todo valor futuro a éste, en un intervalo de tiempo bien definido, se tiene el estado del sistema en el escenario deseado ($\forall t \in [t_e, t_f]$ se cumple $x(t) \in A_D$), vea Figura (12).

De modo contrario, diremos que los comportamientos de los indicadores como el presentado en la Figura (13), no cumplen con la región deseada porque, aunque el sistema se encuentra en el escenario deseado para el primer tiempo de evaluación, su condición posterior evoluciona fuera del escenario deseado en el intervalo definido, i.e. $x(t_e) \in A_D$ pero $x(t) \notin A_D, \forall t \in (t_e, t_f]$,

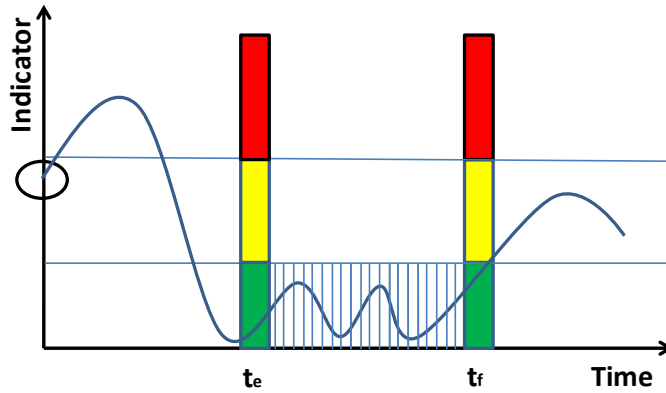


Figura 12. Evaluación prospectiva de indicadores de sostenibilidad.

Nota: En la figura vemos tres escenarios: escenario deseado en verde, escenario de alerta en amarillo y escenario no deseado en rojo. También vemos la evolución de un indicador de sostenibilidad, desde una cierta condición inicial en escenario de alerta. Note que desde un tiempo de evaluación t_e , hasta un tiempo final t_f , el indicador se encuentra en el escenario deseado (zona rayada).

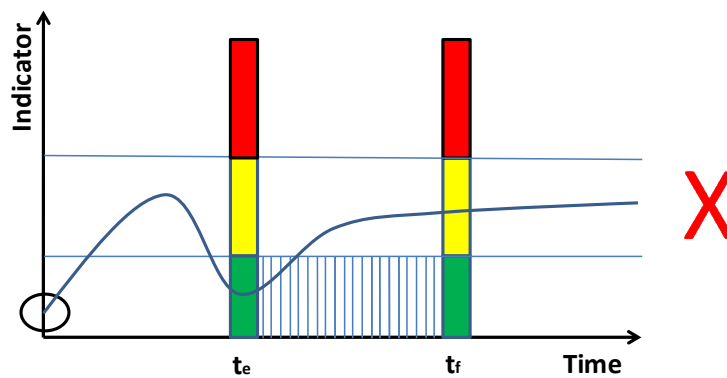


Figura 13. Evaluación de un indicador que no cumple con la región deseada.

Nota La órbita del indicador alcanza el escenario deseado para el tiempo de evaluación, pero evoluciona a otros escenarios antes de terminar el tiempo posterior definido en la zona rayada.

El propósito de la evaluación prospectiva es que el tomador de decisiones pueda conocer si alcanzará las metas fijadas para sus indicadores o si debe aplicar algún tipo de acciones que le permitan alcanzarlas y experimentar estas acciones mediante simulación antes de implementarlas, vea por ejemplo la Figura (14). Donde para valores del tiempo posteriores al intervalo de evaluación se podría llegar a la región deseada. Entonces, lo que se puede suponer es que el tiempo de evaluación se estableció inadecuadamente o que el tiempo de evaluación es demasiado pronto para el cumplimiento de las metas que, si se alcanzarán.

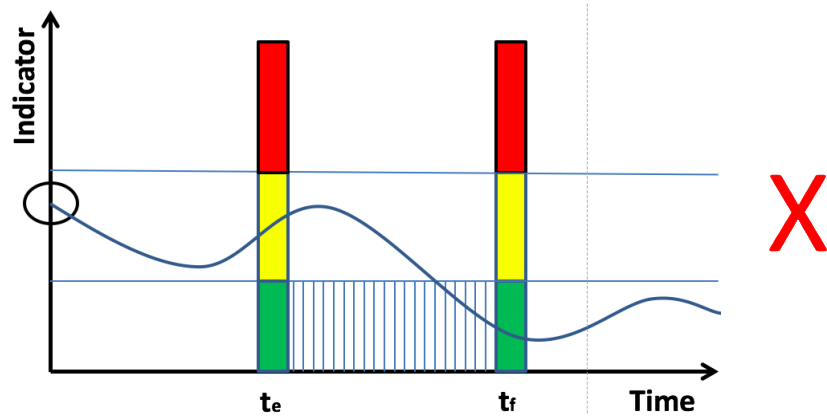


Figura 14. Ejemplos de evaluación de indicadores que no cumplen con la región deseada.

- Conclusiones de capítulo

Se discutió sobre el modelamiento con Dinámica de Sistemas (Aracil y Gordillo, 1997; Sterman, 2000), Se evidenció la fuerte relación conceptual que existe entre las fases de modelado de cada uno de los autores de mayor impacto, y lo que propone cada fase, así mismo se discute sobre la importancia de Teoría de Viabilidad para la evaluación prospectiva de sostenibilidad, teniendo en cuenta que dadas unas condiciones de restricción que fueron definidas sobre las variables de estado, se da lugar a regiones prospectivas delimitadas (Deseado, No deseada y Alerta) y se propone el siguiente marco conceptual expresado gráficamente en la Figura 14.

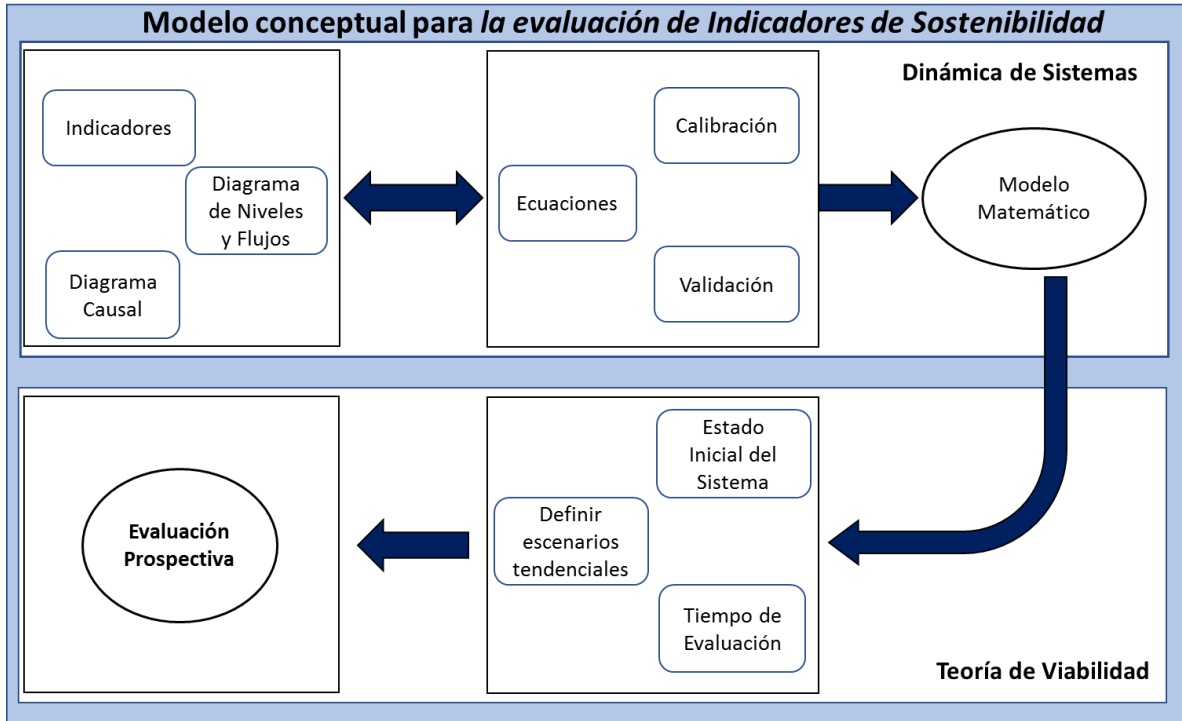


Figura 15. Marco metodológico para la evaluación de la sostenibilidad en biocombustibles.

Basado en: (Serman 2000, Walter et al 2016 y Aubin, 2011).

Capítulo 4. Modelado y evaluación de indicadores de sostenibilidad

Para el desarrollo de este capítulo se realizó un modelamiento de la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar, teniendo en cuenta como límite de estudio las etapas que se presentan en la siguiente figura.

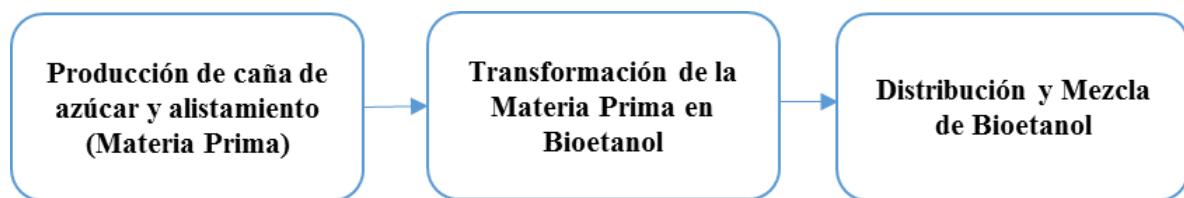


Figura 16. Límites de la cadena de suministro de bioetanol utilizada en este estudio.

4.1 Modelado del Sistema a estudiar.

Para la definición del modelo, se partió de la identificación de cuatro atributos principales a tener en cuenta dentro de la estructura para la evaluación de sostenibilidad de la cadena de suministro de bioetanol Figura (17), esta estructura genérica incluye, la obtención de las materias primas del cultivo de caña de azúcar, la producción nacional de bioetanol como punto principal que impacta a la sostenibilidad. Igualmente se definió la productividad, como el atributo que conecta la producción de bioetanol con el incremento del cultivo de caña de azúcar para la continuidad de producción, en función de la sostenibilidad o las variables que la compongan, en este caso los indicadores. La hipótesis dinámica inicial se presenta a continuación:

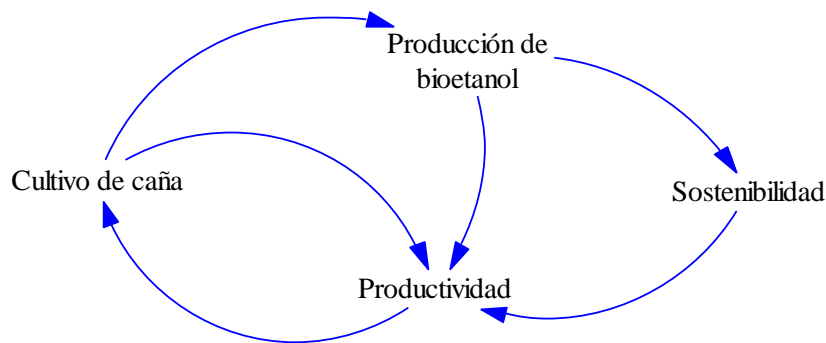


Figura 17. Hipótesis dinámica inicial.

A continuación se presentan y definen los principales atributos que fueron identificados para obtener y delimitar el sistema a estudiar de esta tesis, los cuales, describen las partes que componen la cadena de suministro de bioetanol, la cual fue descrita en el Capítulo 2.

- Hectáreas de Caña: Es la cantidad de hectáreas de caña sembradas para la producción de bioetanol.
- Incremento Neto: Tasa de incremento hectáreas la caña para la producción.
- Cosechado: Cantidad de Hectáreas que se cosechan y se destinan para la producción de bioetanol.
- Alistamiento de la caña de azúcar: Proceso de limpieza y molienda de la caña cosechada para la obtención de jugo de caña fermentable.
- Capacidad Instalada: Potencial de producción o volumen máximo de producción bioetanol que tiene el país.
- Jugo de caña: Cantidad de jugo de caña destinado a la fermentación.
- Producción de Bioetanol: Proceso productivo en función de tasa de producción del jugo fermentable y la capacidad instalada
- Bioetanol producido: Acumulación el litros de bioetanol producidos.
- Distribución: Cantidad de bioetanol destinado a la mezcla con gasolina.
- Productividad: Indicador económico que muestra la cantidad de volumen de bioetanol producido por hectárea de caña.

A partir de la identificación de los atributos del sistema, se procede a la construcción del diagrama causal básico de una cadena de suministro simple. Cabe resaltar que para la lectura del diagrama causal se entiende que si el atributo x aumenta, entonces causa que el atributo y aumente o disminuya, (dependiendo de la polaridad de la relación causal evaluada). Como se presenta a continuación:

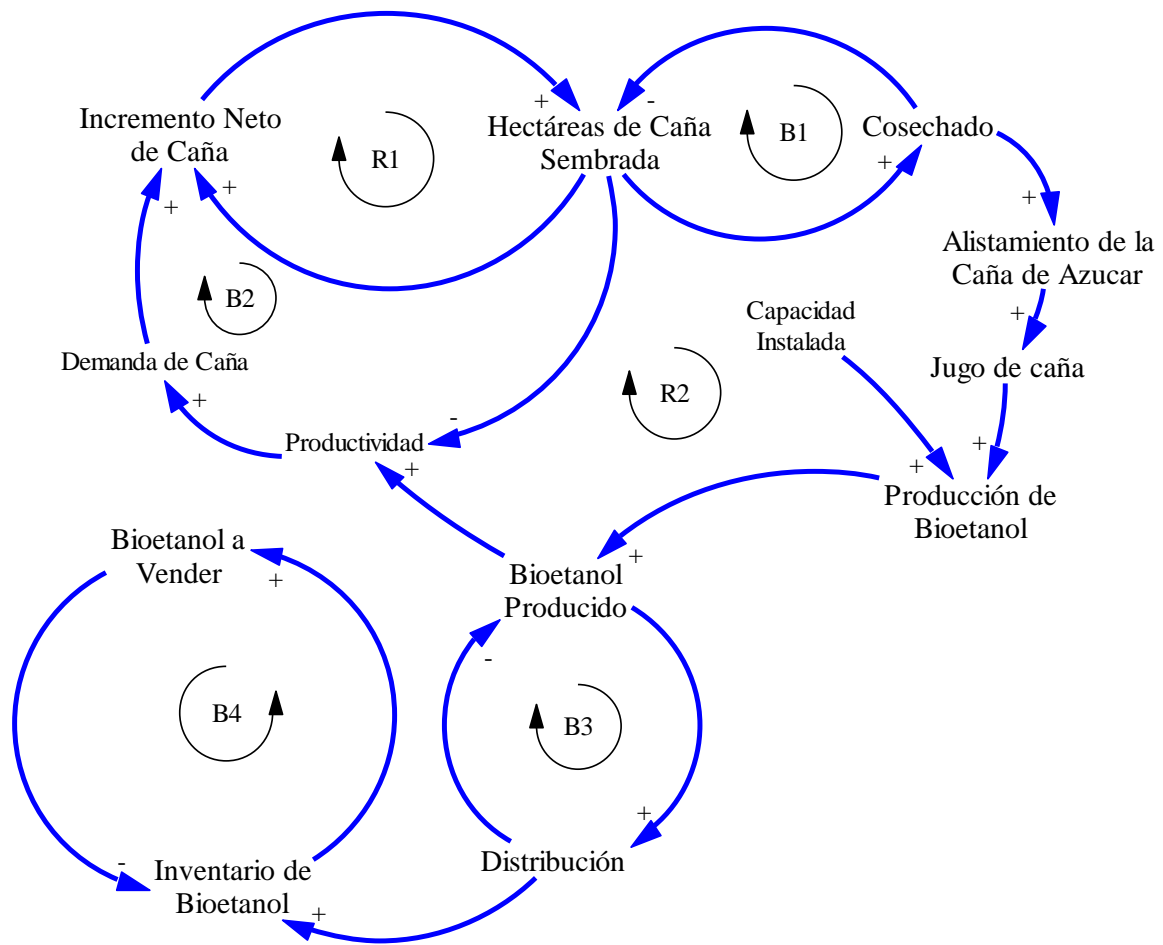


Figura 18. Diagrama Causal de la cadena de suministro de bioetanol.

En el diagrama causal obtenido se tienen entonces seis estructuras o bucles de realimentación, el bucle R1 y B1 son la parte de materias primas de la cadena, con una dinámica propia del cultivo de caña de azúcar, es decir las hectáreas de cultivo de caña aumentan cuando aumentan la decisión de aumentar la siembra de caña medido como incremento neto y las hectáreas de caña disminuyen con el cosechado de cultivo. En la misma sección de materias primas se encuentra la productividad, que está en función de la relación entre la cantidad de bioetanol que se produzca y la cantidad hectáreas de caña sembradas. Esta al ser positiva se traduce en un aumento de la demanda de caña, la cual lleva al aumento de siembra de caña, formando así el bucle R2. Por su parte el B2 representa el lado de la cadena que muestra la producción de bioetanol de caña, pues su obtención depende la cantidad de caña cosechada que aumenta la cantidad de caña en procesos de alistamiento, a partir de la cual se obtiene el jugo de caña, que es llevado a producción de bioetanol. Esta producción de bioetanol, naturalmente aumenta el inventario o cantidad de bioetanol producido, pero depende de la

capacidad instalada anual de producción. El B3 y B4 representan una acumulación y desacumulación de inventario o del bioetanol producido, por la dinámica del mercado que incluye el transporte del producto y su venta o fase final que sería la mezcla con la gasolina para disposición de los consumidores.

Luego de conceptualizar la cadena de suministro de bioetanol, se formula el diagrama de Niveles y Flujos, también conocido como diagrama de Forrester. Éste inicialmente está conformado por tres variables de nivel o variables de estado: Área de Caña Sembrada, Bioetanol producido, Inventario de Bioetanol. Las variables en círculos son las variables auxiliares las cuales permiten el cálculo de las variables de flujo que alimentan o desacumulan las variables de nivel. El diagrama se muestra a continuación:

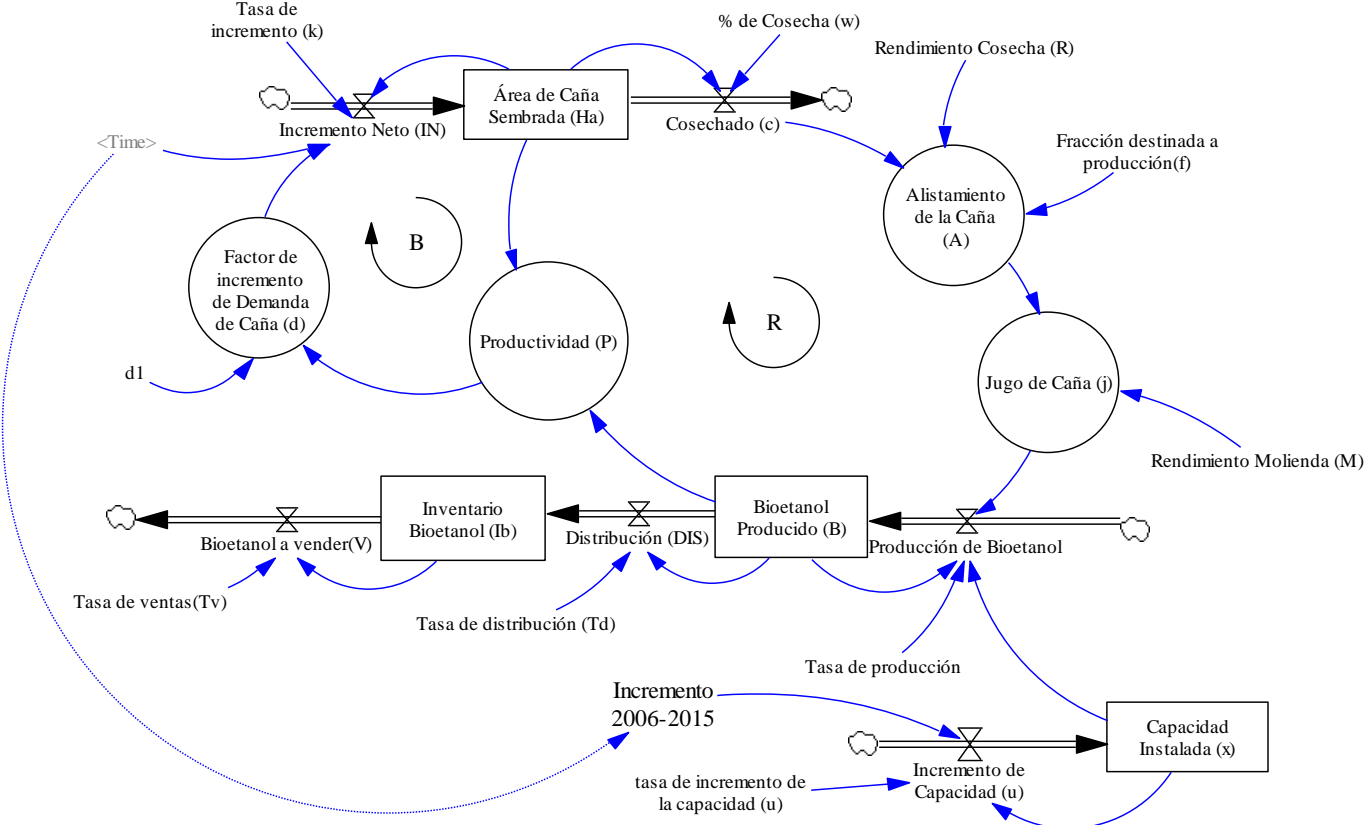


Figura 19. Diagrama de Niveles y Flujos de la cadena de suministro de bioetanol.

A partir del diagrama de niveles y flujos, se construyen las ecuaciones que representan la evolución temporal de las variables de estado del sistema. De esta forma se indica que las

hectáreas de caña sembradas están dadas por:

$$\frac{dHa}{dt} = IN - C,$$

donde IN es el incremento neto, el cual está dado por el cambio de un factor de demanda de caña de azúcar (d) con relación al tiempo y las hectáreas de caña sembradas (Ha) y se define por una función a trozos (Vea Figura 20), como se presenta a continuación:

$$IN = \begin{cases} Ha + (Ha.k) & Si t < ti \\ Ha + (Ha.k1).d & Si t \geq ti \end{cases}$$

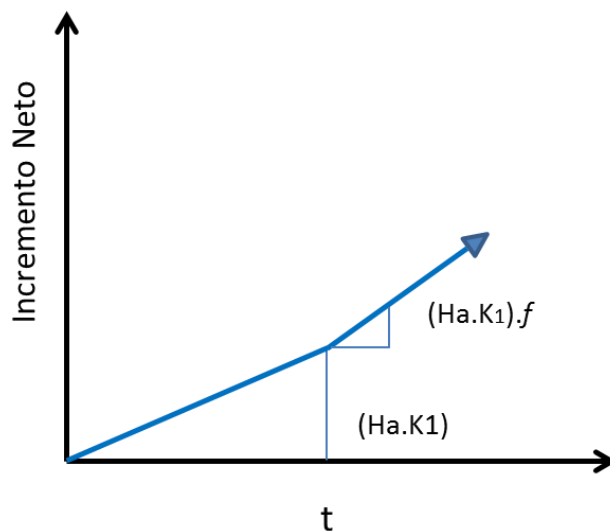


Figura 20. Función a trozos que representa el incremento neto.

La variable de flujo cosechado C es la cantidad de hectáreas caña de azúcar que se cosechan por una fracción de hectáreas w. Esta se da por:

$$C = Ha.w$$

Las variables de flujo IN y C son medidas en hectáreas de caña Ha.

La producción de bioetanol se estima anualmente, esta acumula en la variable de nivel bioetanol producido B la cual está dada por:

$$\frac{dB}{dt} = \text{Producción de B} - DIS,$$

donde el flujo Producción representa la producción de bioetanol representada por una función

a trozos que depende de la capacidad instalada x , la cantidad de jugo de caña extraído j y una tasa de producción $t1$ como se muestra a continuación:

$$\text{Producción de } B = \begin{cases} x & \text{si } B \geq x \\ j \cdot \text{tasa de } p & \text{Si } B < x \end{cases}$$

El parámetro tasa de producción *tasa de p* es un parámetro porcentual que relaciona la producción de bioetanol a partir del jugo de caña y va de 0-1. Permite la calibración del modelo.

A su vez el jugo de caña j está definido por el producto entre rendimiento R y la variable auxiliar Alistamiento de Caña A , la cual está en función del rendimiento de cosecha Rc , la tasa de molienda TM y la fracción destinada a Bioetanol f , expresado así:

$$j = A \cdot M, \text{ donde } A = (R \cdot C) \cdot f.$$

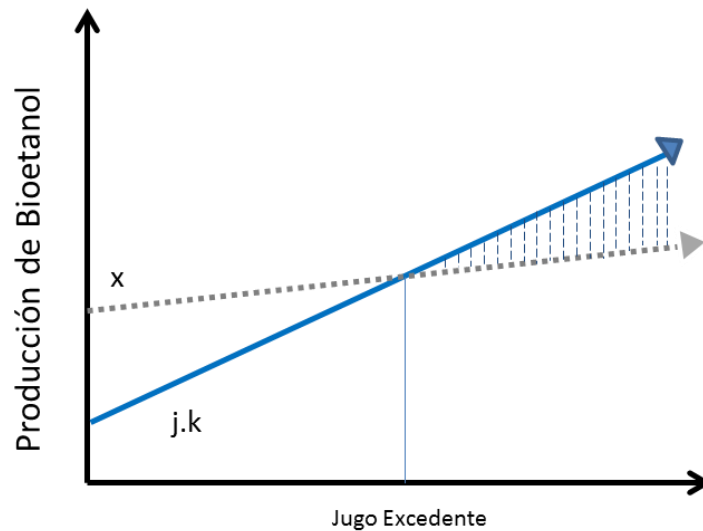


Figura 21. Función a trozos que representa el incremento de producción de bioetanol.

La capacidad instalada en este modelo está representada de la siguiente manera:

$$\frac{dx}{dt} = s ;$$

$$s = \begin{cases} \text{Table function} & \text{if } t < t_i \\ (x \cdot u) & \text{if } t \geq t_i \end{cases}$$

La variable de flujo Distribución DIS , está dada por:

$$DIS = B.Td.$$

La cantidad de Inventario de Bioetanol Ib se representa por la diferencia entre lo distribuido DIS a stock y lo vendido V :

$$\frac{dIb}{dt} = DIS - V.$$

Las ventas se relacionan a una tasa de ventas Tv constante:

$$V = IB.Tv.$$

Para la estimación del incremento neto, se asocia un factor de demanda d , el cual está en función de la *Productividad*, la cual se define por la cantidad de Bioetanol producido B sobre la cantidad de hectáreas de caña destinadas a producción Ha :

$$Productividad = \frac{B}{Ha}$$

$$Factor\ demanda = \begin{cases} f1 & si\ P \geq n \\ f2 & si\ P < n \end{cases}$$

4.2 Comportamiento del Modelo.

Una vez obtenido el sistema de ecuaciones que representa el problema estudiado, se procede a realizar la simulación con las condiciones iniciales definidas, estas fueron obtenidas de datos históricos mercado Colombiano de bioetanol de caña azúcar desde el año 2006 al 2015. Su detalle se presenta en la Tabla 5. Para esta simulación inicial se utilizó el software Vensim Ple. 7.1 con un periodo del 2006 al 2030.

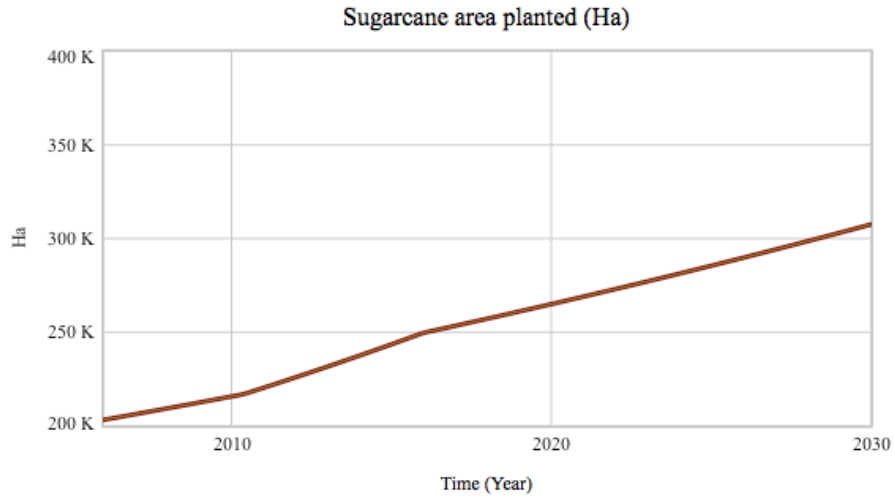


Figura 22. Simulación de las Hectáreas de caña de 2006-2030

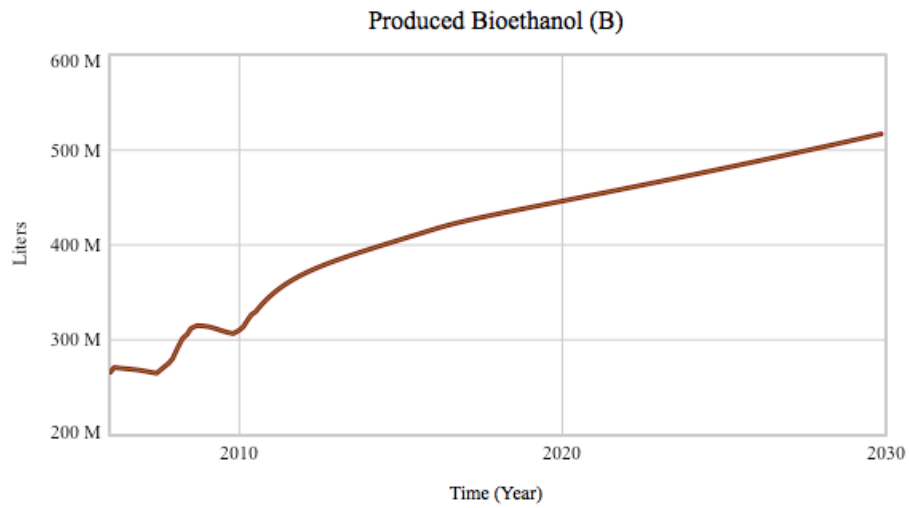


Figura 23. Simulación del Bioetanol producido de 2006-2030

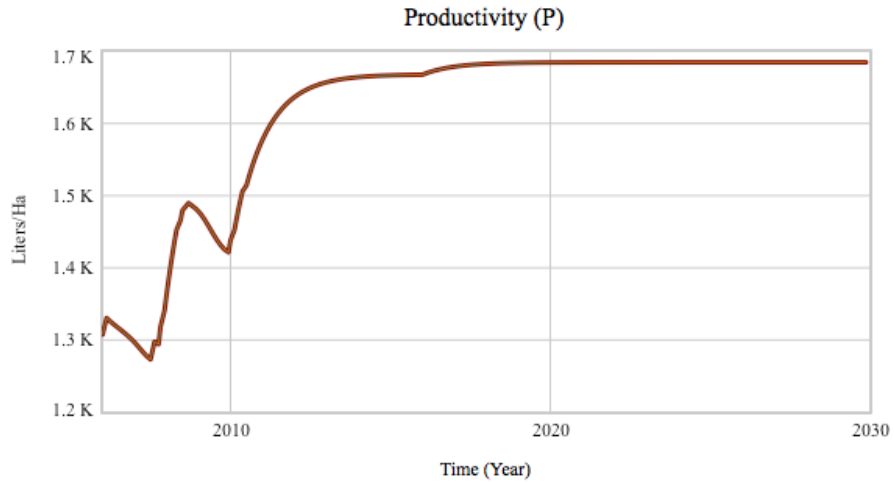


Figura 24. Simulación de la productividad.

4.3 Validación del Modelo de la Cadena.

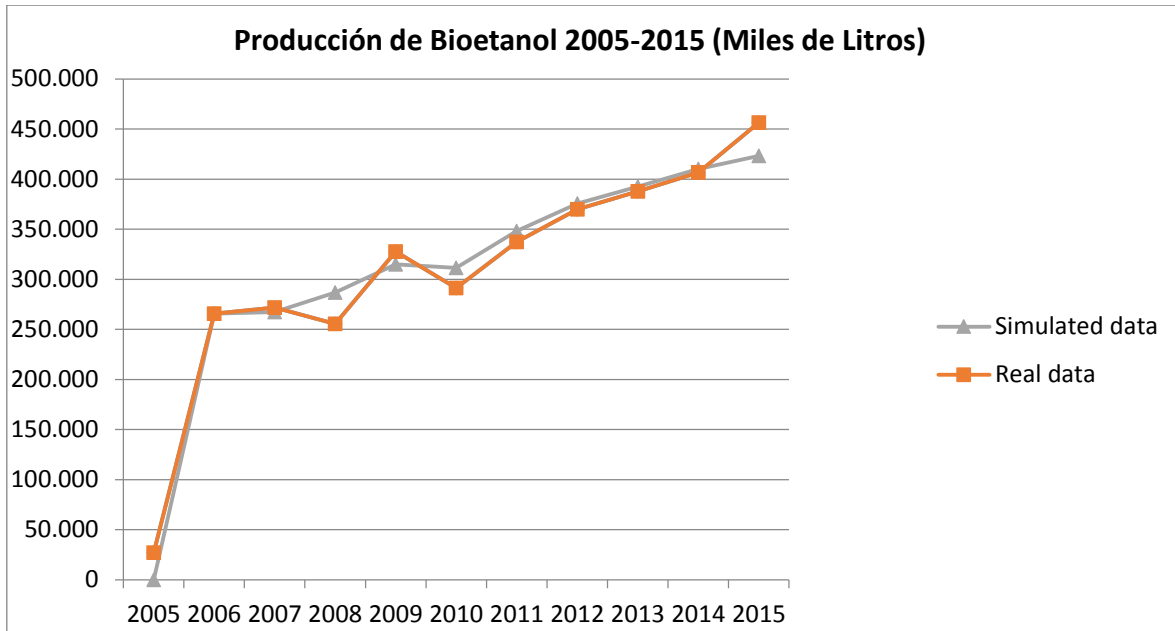


Figura 25. Comparación entre datos históricos de producción de Bioetanol y datos de simulación.

Una vez simulado el modelo de la cadena de suministro de bioetanol, es necesario entonces realizar una validación que relacione la hipótesis dinámica, la estructura del modelo y su comportamiento (Cárdenas, 2015). En Dinámica Sistemas, existen diferentes criterios o técnicas de validación establecidos por (Barlas, 1989) donde, principalmente se requiere la validación de la estructura y comportamiento.

De esta forma, para la validación de la estructura, se comenzó con la estimación de los parámetros, con esto, se busca justificar el valor de los parámetros del modelo con la información histórica (Cárdenas, 2015), para este caso, con la información de la producción real de bioetanol de caña de azúcar en Colombia. Los parámetros que fueron considerados en el modelo de la cadena de suministro se presentan en la Tabla 5. La estimación de los parámetros más importantes tales como incremento neto de cultivo de caña y el Incremento de la producción de bioetanol, se presentan en la Tabla 6, y la Tabla 7. Para el incremento neto de caña y el incremento de capacidad instalada, la validación Consistió fundamentalmente en encontrar los valores promedio de producción anual de bioetanol y la capacidad instalada desde el 2006 hasta el 2015, con base en esto se estimó la tasa del incremento neto de producción anual de bioetanol y se incluyó dentro del modelo.

Tabla 5. Parámetros y condiciones iniciales del modelo.

Parámetro/ Condición inicial	Valor	Unidades	Fuente
Rendimiento Cosecha	118	Ton/ha	CUE, 2012
Rendimiento Molienda	70	Litros/Ton	CUE, 2012
Incremento Neto Caña	Estimación promedio de 2006-2015	Porcentaje	Asocaña, 2016
Incremento de Capacidad	Estimación promedio de 2006-2015	Porcentaje	Asocaña, 2016
Hectáreas de caña	203.184	ha	Asocaña, 2012
Bioetanol producido	265.684	Miles de litros	FedeBiocombustibles, 2015

Tabla 6. Estimación de tasa de incremento de Cultivo de caña

Año	Área neta sembrada Nacional (hectáreas)	Incremento Neto
2006	203.184	NA
2007	202.926	-0,1270
2008	205.664	1,3493
2009	208.254	1,2593
2010	218.311	4,8292
2011	223.905	2,5624
2012	227.748	1,7164
2013	225.560	-0,9607
2014	230.303	2,1028
2015	232.070	0,7673
	Promedio	1,499

Tabla 7. Estimación tasa de incremento de Producción de Bioetanol.

Año	Producción (Miles de litros).	Producción Simulación	Incremento Neto (%)
2006	265.684	146.000	NA
2007	271.773	284.223	2,29
2008	255.584	304.196	-5,96
2009	327.705	322.045	28,22
2010	291.286	343.088	-11,11
2011	337.398	362.915	15,83
2012	369.722	385.776	9,58
2013	387.859	409.477	4,91
2014	406.468	431.624	4,80
2015	456.403	444.329	12,29
	Promedio del incremento		6,760

Tabla 8. Caña Molida y Hectáreas de caña sembrada.

Año	Caña molida Toneladas	Caña Molida Toneladas (Simulación)	Área neta sembrada Hectáreas	Área neta sembrada Hectáreas (Simulación)
2006	22.019.933	21.907.400	203.184	203.184
2007	21.090.203	22.250.100	202.926	206.297
2008	19.207.728	22.587.400	205.664	209.424
2009	23.588.646	22.929.800	208.254	212.599
2010	20.272.594	23.277.400	218.311	215.822
2011	22.728.758	23.630.300	223.905	219.094
2012	20.823.629	23.988.600	227.748	222.416
2013	21.568.243	24.352.200	225.560	225.788
2014	24.283.248	24.721.400	230.303	229.211
2015	24.205.089	25.096.200	232.070	232.685

Como complemento a la validación del comportamiento, se utilizó el cálculo del Error medio de porcentaje absoluto (MAPE), que calcula la precisión de la tendencia del modelo, definiendo un MAPE hasta un 30% como válido (Barlas, 1989, Bautista, 2016). El MAPE se calculó para Caña Molida, Área de Caña Sembrada y Bioetanol Producido (Las más importantes para la cadena de suministro), los valores generados por el modelo se

compararon con los valores históricos recogidos entre 2006 y 2015. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$MAPE = \frac{100 \%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Real_i - Simulado_i}{Real_i} \right|$$

Tabla 9. MAPE de simulación de tres principales variables.

Variable	MAPE 2006-2015	%
Caña Molida	7.217	
Área de Caña Sembrada	0,016	
Bioetanol Producido	6,742	

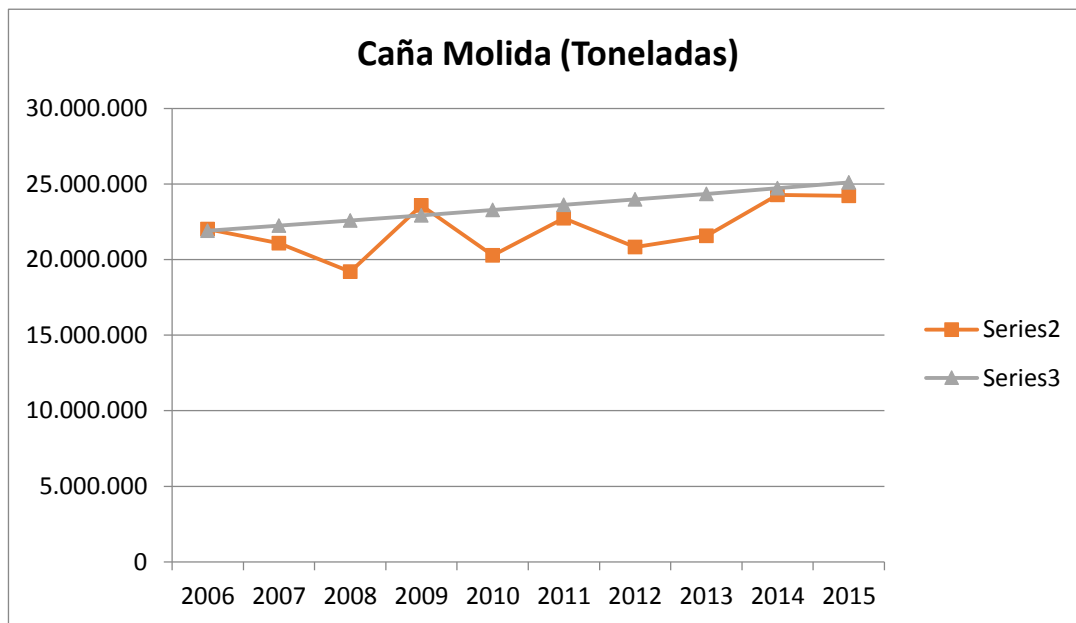
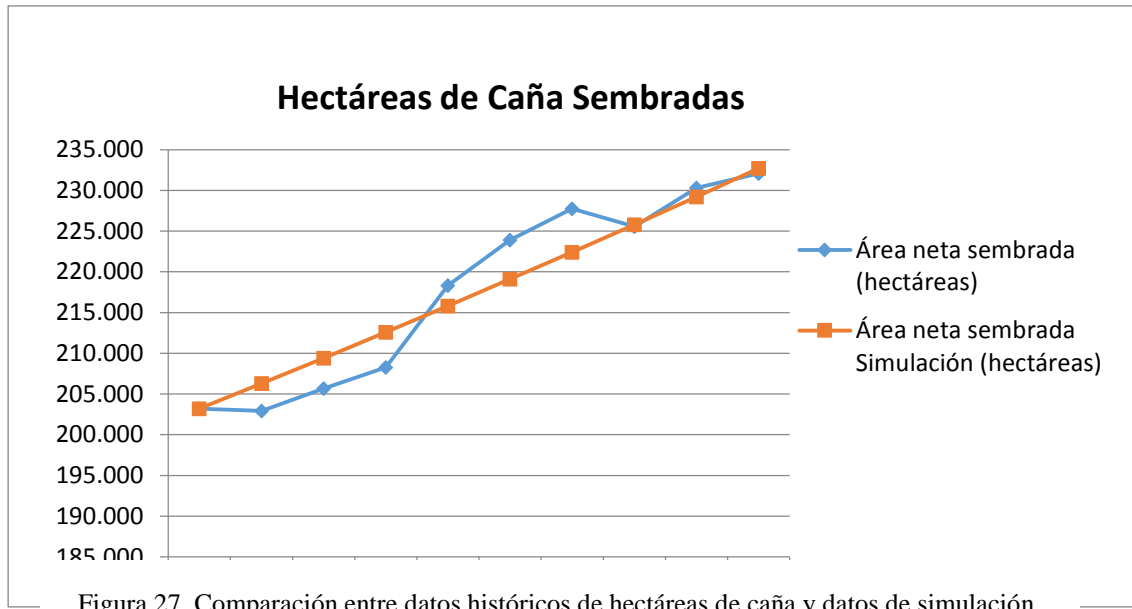


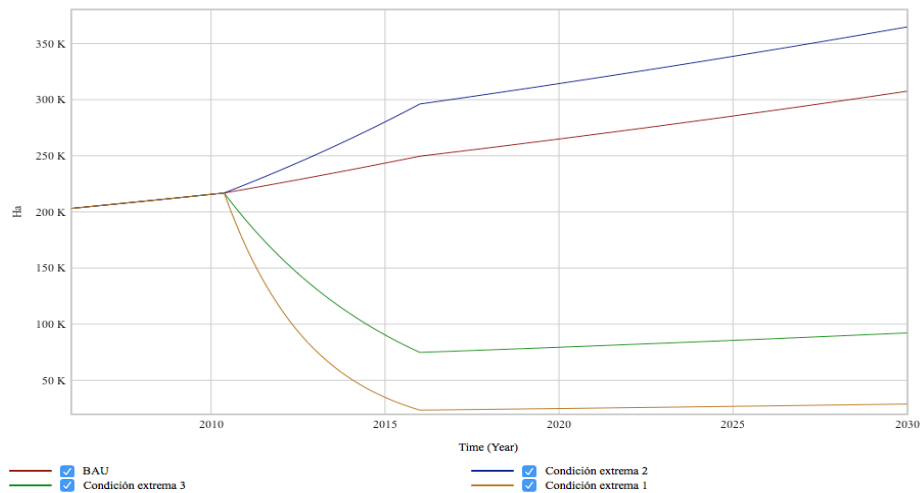
Figura 26. Comparación entre datos históricos de Molienda de caña y datos de simulación.



- Prueba de condiciones extremas

En esta prueba se asignaron valores extremos a las siguientes variables de la cadena de suministro de bioetanol, con el objetivo de estudiar el comportamiento del sistema e identificar irregularidades en la estructura del modelo:

- Demanda de caña de azúcar
- Incremento Neto de caña.



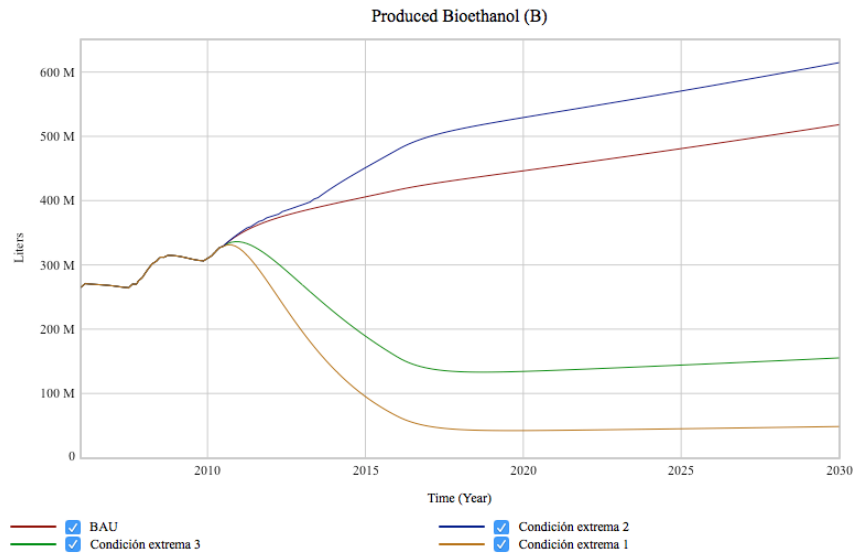
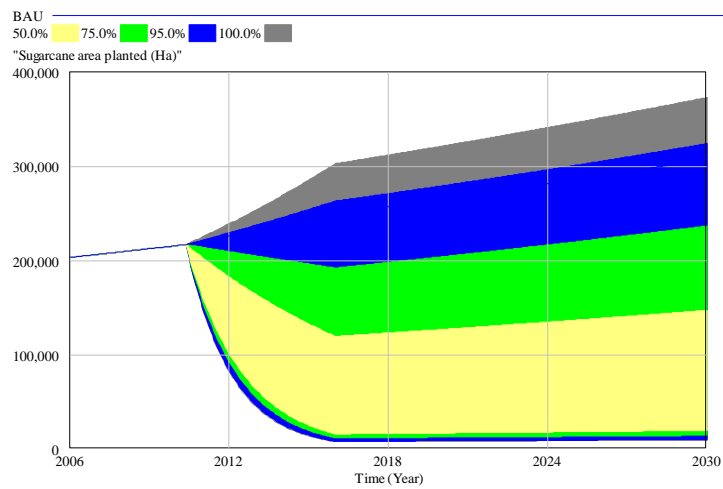


Figura 29. Escenarios de condición extrema de producción de bioetanol.

- Prueba de Sensibilidad

A continuación se muestran los resultados del análisis de sensibilidad numérica que se realizaron al modelo inicial. Sensibilidad numérica existe cuando cambios en los supuestos cambian los resultados numéricos (Valencia, 2017). Esta prueba se realizó con el software Vensim Plus. Este software tiene la capacidad de hacer repetidas simulaciones en las que se modifican los parámetros del modelo seleccionados, para cada simulación. Esto puede ser muy útil para entender los límites de comportamiento de un modelo.



Sensibilidad Bioetanol

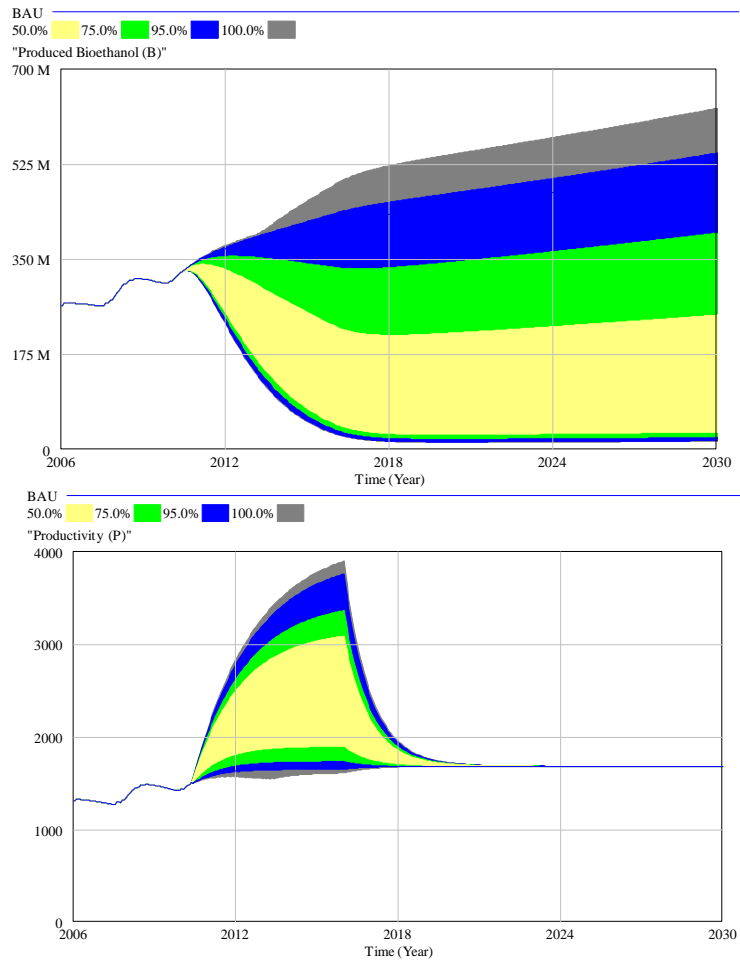


Figura 30. Análisis de sensibilidad numérica.
 Variando la tasa de crecimiento de la demanda (d1) con valores (0.4 a 1.05)

4.4 Conclusiones de Capítulo.

En este capítulo se obtuvo un modelo validado y calibrado de la cadena de suministro de bioetanol de caña de azúcar, dando cumplimiento al objetivo específico número uno de esta tesis, el cual se refiere a la caracterización y modelado del sistema inicial.

En el desarrollo de este capítulo, se evidenció todo el proceso de modelamiento con Dinámica de Sistemas, el cual permitió contribuir al desarrollo del primer artículo científico de la tesis. A partir de ahora se cuenta con un Modelo que va a permitir, el aprendizaje y diseño de políticas para el sector de la producción de bioetanol, de igual manera este modelo se toma de base para la vinculación y evaluación de indicadores de sostenibilidad que se muestran en el siguiente capítulo.

Capítulo 5. Modelado y Evaluación de Indicadores de Sostenibilidad

Una vez definido el modelo matemático de la cadena de suministro, calibrado y validado se procede entonces a vincular las variables sociales y ambientales que hacen referencia a los indicadores de sostenibilidad. Esto se hace teniendo en cuenta el diagrama causal de la cadena de suministro de bioetanol (Ver figura 18), construido en el anterior capítulo. Estos indicadores ambientales van asociados a algunas etapas de la cadena. Una estructura genérica que propone el procedimiento para esta vinculación se muestra en la figura (31), la cual muestra la integración por módulos del pilar ambiental (Color verde), social (Color Naranja) y económico (Color azul) del problema estudiado.

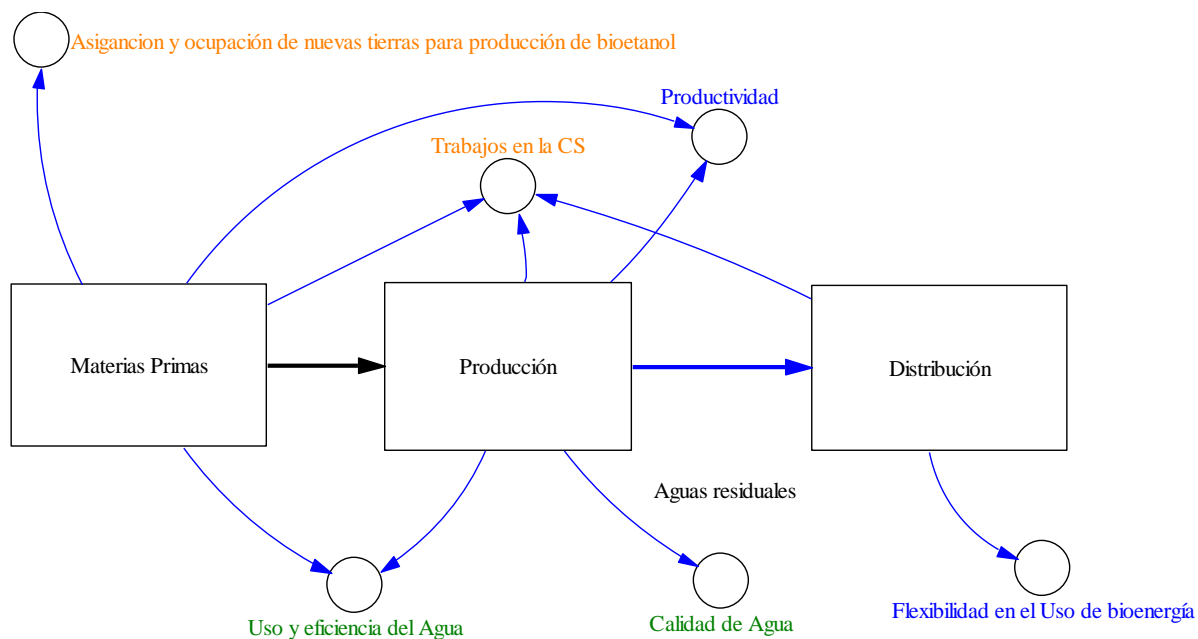


Figura 31. Estructura Sistémica general con indicadores de sostenibilidad.

5.1 Definición de los Indicadores de Sostenibilidad.

Tabla 10. Evaluación cualitativa de uso de indicadores.

<i>N°</i>	<i>Indicador</i>	<i>Aplicabilidad al contexto Colombiano</i>	<i>Información disponible</i>	<i>Impacto de acuerdo con las políticas Colombianas</i>	<i>Pertinencia de Modelado con Dinámica de Sistemas</i>
1	<i>Ciclo de vida de los Gases de Efecto Invernadero</i>	X	X	X	
2	<i>Calidad del suelo</i>	X		X	
3	<i>Niveles de cosecha de recursos madereros</i>				X
4	<i>Emisiones de contaminantes del aire que no son GEI (Contaminantes criterio)</i>	X	X	X	
5	<i>Uso y eficiencia del agua</i>	X	X	X	X
6	<i>Calidad del agua</i>	X	X	X	X
7	<i>Diversidad biológica en el paisaje natural</i>	X			
8	<i>Uso de la tierra y cambio de uso de la tierra relacionados con la producción de materia prima para bioenergía</i>	X	X	X	X
9	<i>Asignación y tenencia de la tierra para nueva producción de bioenergía</i>	X		X	X
10	<i>Precio y oferta de una canasta alimentaria nacional</i>		X	X	
11	<i>Cambio en ingresos</i>	X			
12	<i>Empleos en el sector de la bioenergía</i>	X	X	X	X
13	<i>Cambio en tiempo no pagado invertido por mujeres y niños en la recolección de biomasa</i>				

14	<i>Bioenergía usada para ampliar el acceso a servicios modernos de energía</i>				X
15	<i>Cambio en la mortalidad y tasas de enfermedades atribuibles a humos en espacios cerrados</i>				X
16	<i>Incidencia de lesiones, enfermedades y muertes laborales</i>	X		X	X
17	<i>Productividad</i>	X	X	X	X
18	<i>Balance neto de bioenergía</i>		X	X	
19	<i>Valor añadido bruto</i>	X		X	
20	<i>Cambio en el consumo de combustibles fósiles y en el uso tradicional de la biomasa</i>			X	X
21	<i>Formación y recualificación de los trabajadores</i>		X		X
22	<i>Diversidad energética</i>	X	X	X	
23	<i>Infraestructura y logística para la distribución de bioenergía</i>		X		
24	<i>Capacidad y flexibilidad del uso de la bioenergía</i>	X	X	X	X

Los indicadores evaluados en esta tesis, fueron seleccionados (resaltados en verde) teniendo en cuenta los criterios de la tabla 10, y sobre la base que son prácticos al modelarlos, no son ambiguos, son sensibles y adaptativos a los cambios o incrementos de la producción de bioetanol.

A continuación se presenta la descripción conceptual de cada uno de los indicadores a evaluar, agrupados en los pilares de sostenibilidad:

5.1.1 Indicadores Ambientales

- **Uso y eficiencia del agua**

- a) Se define como uso del agua en el sector, a la cantidad de agua extraída de cuencas hídricas determinadas a nivel nacional, para la producción y procesamiento de materias primas para la bioenergía, y se puede expresar como el porcentaje de recursos hídricos renovables reales totales (TARWR, por sus siglas en inglés) y como el porcentaje de las extracciones de agua anuales totales (TAWW, por sus siglas en inglés), desagregadas en fuentes de agua renovables y no renovables.
- b) Otra definición permitida del uso del agua es, el volumen de agua extraído de cuencas hídricas determinadas a nivel nacional, usado para la producción y el procesamiento de materias primas para bioenergía por unidad de bioenergía producida. Se expresión más común es en m³.

En esta tesis se usó la sección b para el indicador de uso y eficiencia del agua.

- **Calidad del agua**

Aunque, la calidad del agua en Colombia se define como el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, la definición y las medidas para el sector de bioenergía propuestas por el GBEP son las siguientes:

- c) Cantidades de contaminantes que entran en las vías fluviales y otras aguas, atribuibles a la aplicación de fertilizantes y pesticidas para el cultivo de materias primas para bioenergía, y expresadas como el porcentaje sobre las cantidades de contaminantes procedentes de los efluentes totales, de la producción agrícola en la cuenca hídrica.
- d) Cantidades de contaminantes que entran en las vías fluviales y otras aguas, atribuibles a los efluentes de procesamiento de bioenergía.

En esta tesis se usó la sección d para el indicador de calidad del agua en términos de DBO.

5.1.2 Indicadores Sociales

- **Empleos en el sector de la bioenergía.**

Para este caso se admiten los dos siguientes conceptos:

- e) Creación de empleo neta, como resultado de la producción y el uso de la bioenergía, total y desagregado (si es posible), de la siguiente manera: Cualificado/No cualificado, o Temporal/Indefinido.
- f) Número total de empleos en el sector de la bioenergía y porcentaje que cumple con las normas laborales reconocidas nacionalmente, congruentes con los principios enumerados en la Declaración de la OIT sobre Principios y Derechos Fundamentales en el Trabajo, en relación con sectores comparables.

En esta tesis se usó la sección e para el indicador de Empleos en el sector de la bioenergía de manera total sin desagregar.

- **Asignación y tenencia de la tierra para nueva producción de bioenergía**

Se define según GBEP como: El porcentaje de tierra actual y la tierra usada para nueva producción de bioenergía.

- g) Esta se mide en porcentaje de tierra cultivada para la producción de bioenergía que pertenece a los dueños de las grandes industrias y al porcentaje perteneciente a los granjeros locales.

5.1.3 Indicadores Económicos

- **Productividad.**

La productividad en bioenergía se define cómo:

- h) Productividad de las materias primas para bioenergía por materia prima o por granja/plantación.
- i) Eficiencias de procesamiento por tecnología y materia prima
- j) Cantidad de producto final de bioenergía por masa, volumen o contenido energético por hectárea por año.
- k) Coste de producción por unidad de bioenergía.

En esta tesis se usó la sección j para el indicador de productividad.

- **Capacidad y flexibilidad del uso de la bioenergía.**

- l) Ratio de capacidad para el uso de bioenergía en comparación con el uso real por cada ruta significativa de utilización
- m) Ratio de capacidad flexible que puede usar bioenergía u otras fuentes energéticas frente a capacidad total

Para esta tesis se usó la sección m para el indicador de capacidad y flexibilidad, en términos de cantidad de bioetanol utilizado en mezcla con gasolina.

5.2 Modelamiento de los indicadores

Teniendo en cuenta el modelo de la cadena de suministro del Capítulo 4, se procede a vincular los atributos de los indicadores sociales y ambientales. Esto se hace teniendo en cuenta el diagrama causal construido en la Figura 18.

5.2.1 Evaluación de los Indicadores de Sostenibilidad.

Las anteriores definiciones de los indicadores, permitieron establecer la relación que existe entre ellos y la cadena de suministro de bioetanol. De esta forma, se obtuvo un segundo diagrama causal de la cadena de suministro, pero esta vez con la integración de los indicadores, como se muestra a en la Figura 32.

En este diagrama causal se resaltan los módulos Ambiental, Social y Económico que conforman el sistema a estudiar y se evidencia que el impacto sobre ellos viene directamente de la cadena de suministro representada.

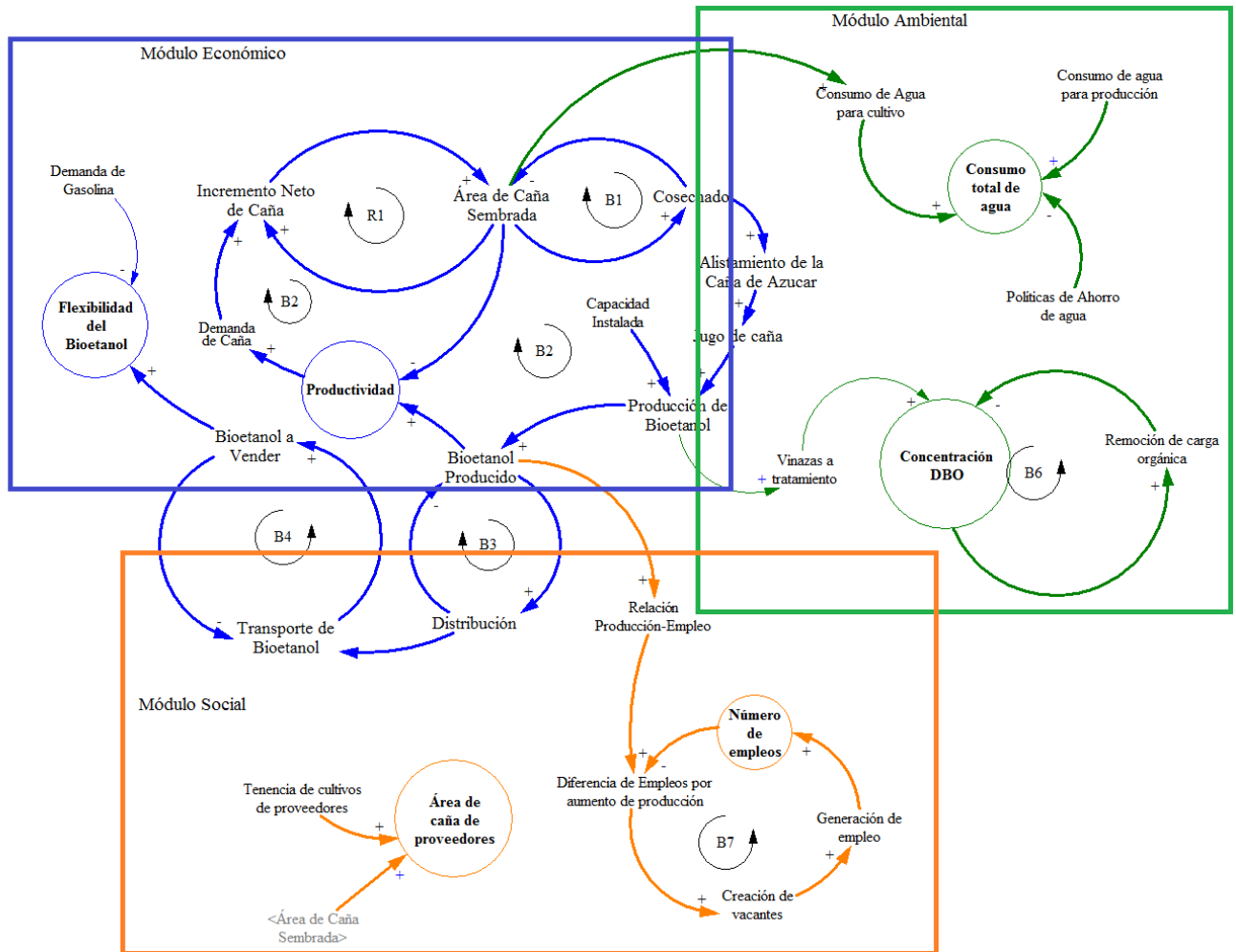


Figura 32. Diagrama causal con indicadores de sostenibilidad.

- **Pilar Ambiental**

a) Modelo para el Indicador Uso y eficiencia del agua

De acuerdo con la evaluación piloto de indicadores GBEP realizada para Colombia (FAO, 2014), más del 90 % de producción de caña se centra en el Valle geográfico del río Cauca, siendo la actividad de riego una de las de mayor extracción de agua relacionada en la producción de bioetanol. Para la evaluación de este indicador se tiene en cuenta dos actividades que generan el consumo o extracción de agua (Water Withdrawal). La primera actividad que genera un consumo de agua, es el cultivo de caña de azúcar para la obtención de la materia prima. Para el modelado de este indicador, se ha despreciado la variabilidad climática y los periodos de lluvia, teniendo en cuenta una información de consumo neto del

sector. De esta forma, se han considerado las siguientes relaciones causales para este indicador. El consumo de agua para el cultivo de caña se incrementa con la cantidad de hectáreas (Ha) de caña sembradas. Así mismo, si aumentan las Ha de caña, entonces aumentará la cantidad de caña cosechada, que después será utilizada como materia prima. De igual manera, se evidencia la segunda actividad que genera un consumo de agua, el cual está en el proceso de producción, ya que la caña cosechada llega a un proceso de alistamiento que incluye lavado y molienda mediante presión mecánica y agua, para extracción del jugo que contiene la sacarosa y se envía al proceso de elaboración de bioetanol. Por lo tanto, al aumentar cantidad de caña a alistar, también aumentará el consumo de agua. De igual manera, al incrementarse la producción de Bioetanol se aumentará la cantidad de agua requerida en la fábrica, estas dos últimas actividades se han englobado en la variable Consumo de Agua por Producción.

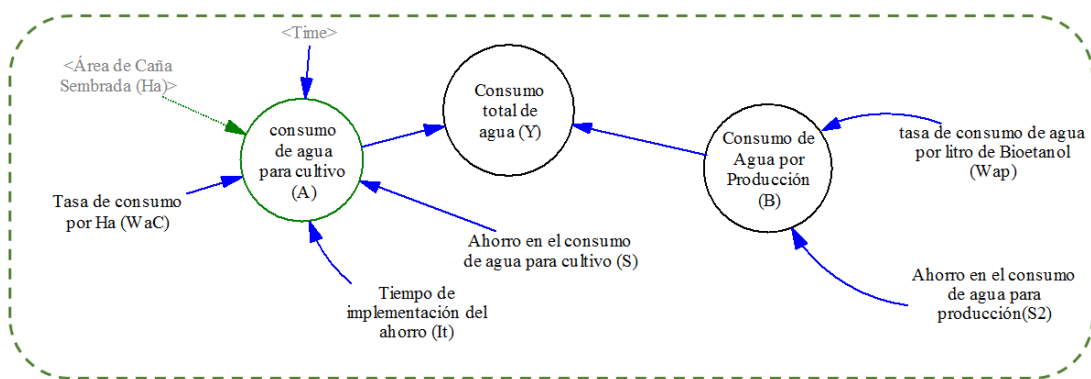


Figura 33. Indicador Uso y eficiencia del agua.

Finalmente, se conforma el diagrama que representa el indicador uso de agua en la producción de bioetanol, y se encuentra vinculado al diagrama presentado en el anterior capítulo de la Figura 19.

Nuevamente se procede a formular las ecuaciones para modelar esta sección. Para la representación del consumo total de agua se tomó la sumatoria de las dos actividades principales identificadas, la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Y = A + B ,$$

donde el flujo A representa el consumo de agua en el cultivo, y se le asocia un parámetro de ahorro s, el cual representaría las estrategias de ahorro. La ecuación se formula con una función a trozos que muestra esta decisión en un tiempo de implementación It:

$$A = \begin{cases} (WaC.Ha) * S , & \text{si } time \geq It \\ WaC.Ha , & \text{si } time < It \end{cases}$$

$$B = PB.Wap.S2$$

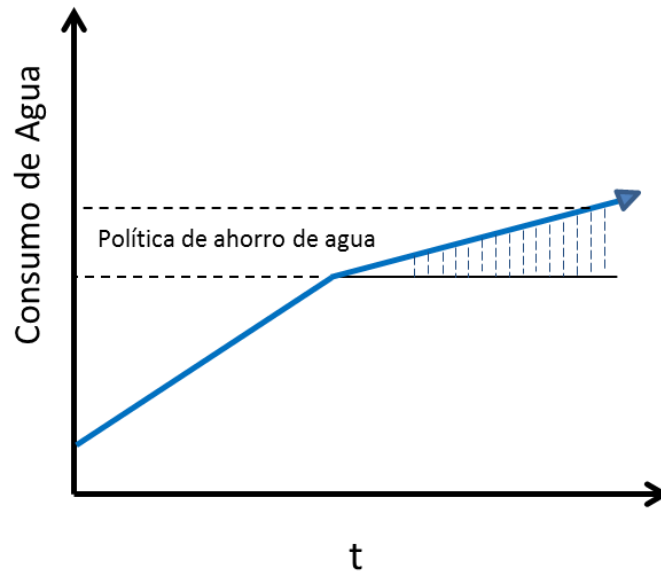


Figura 34. Función a trozos que representa la política de ahorro.

Para la simulación del consumo de agua, el cual es mayormente centrado en el cultivo de caña de azúcar y en el proceso producción de bioetanol se tomó como base la tasa de consumo de 9.000 m³ de agua por hectárea de cultivo año y 0.005 m³ de agua por litro de bioetanol producido (CUE, 2012). De igual manera se generaron tres distintos escenarios donde se implementan ahorros de consumo en el cultivo a partir del año 2017. Ver figura (35).

Lo anterior teniendo en cuenta el escenario base de simulación presentado en la Tabla 5. En la Figura 35a. Se muestra la simulación del sistema sin ninguna estrategia de ahorro, lo cual evidencia el alto consumo de agua, aumentado año tras año la huella hídrica del sector. En la Figura 35. b, c y d, se muestran los comportamientos del consumo de agua con diferentes estrategias de ahorro (S= 0.2; 0.3 y 0.6), partiendo de la implementación para el año 2017.

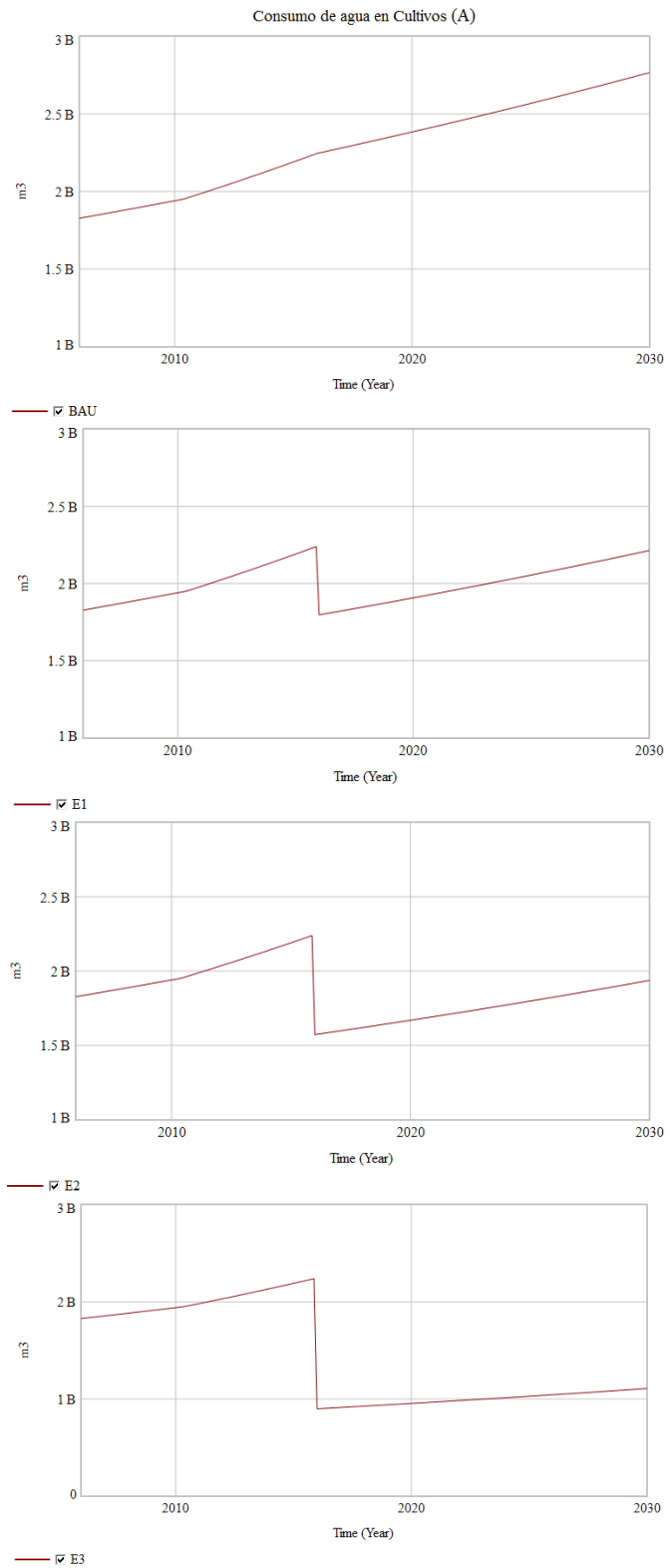


Figura 35. Simulación del consumo de agua con tres escenarios de estrategias de ahorro.

b) Modelo del Indicador calidad del agua.

Para la evaluación de este indicador, es necesario tener en cuenta las actividades que generen descargas de manera puntual directa o difusa, ya sea vertimientos o infiltraciones por escorrentía de los plaguicidas aplicados en el cultivo de caña de azúcar. Una de las formas de evaluar este indicador es con los niveles de contaminantes en los vertimientos de la producción de bioetanol, expresados en concentración de la demanda biológica de oxígeno DBO, como una cantidad total anual en kilogramos/año. Para este indicador solo se tendrá en cuenta la descarga puntual de la carga contaminante de las aguas residuales (Vinazas) del proceso productivo de bioetanol.

- **Generación de vinazas en la producción**

Las vinazas, son las aguas residuales generadas directamente en la producción de bioetanol. La cantidad de vinazas que se generan en el proceso de producción, va directamente asociada a la cantidad de litros de bioetanol que se produzcan y su tasa varía de 3 a 7 litros, sin reducción de volumen. Este efluente tiene unas características específicas tales como pH ácido (3,9-5,1), una alta Demanda Química de Oxígeno DQO (50,000–95,000 mg L⁻¹) y un alto contenido de Demanda Biológica de Oxígeno-DBO (18,900–78,300 mg L⁻¹), dependiendo de la materia prima y eficiencia del proceso. Estas vinazas, requieren de un tratamiento especial por su alta carga contaminante, ya que si estas sustancias se añaden al agua superficial sin tratar, se reduciría el contenido de oxígeno disuelto en el agua generando problemas críticos en la calidad de agua. En Colombia, la vinaza se concentra de 10% hasta 32,5 - 55% de sólidos, en un tratamiento previo denominado Flubex, con el fin de reducir la cantidad de aguas residuales (CUE, 2012). Posteriormente de un tratamiento biológico el agua tratada fluye como agua superficial, siendo este el vertimiento que afectaría la calidad de agua.

De esta forma, se obtiene el bucle de realimentación de la Figura 36, el cual va asociado al mostrado en la Figura 18. El diagrama de Niveles y Flujos que representa el indicador calidad de agua, se muestra en la Figura 37.

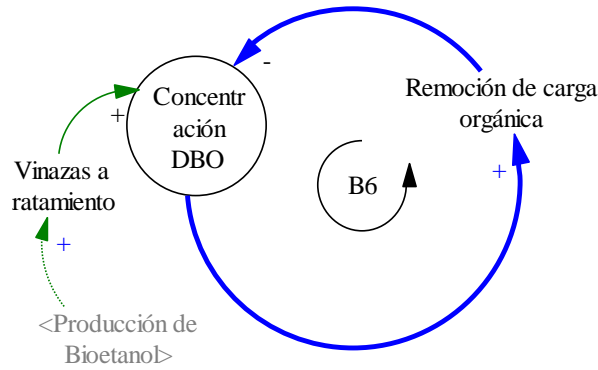


Figura 36. Diagrama Causal Indicador calidad del agua.

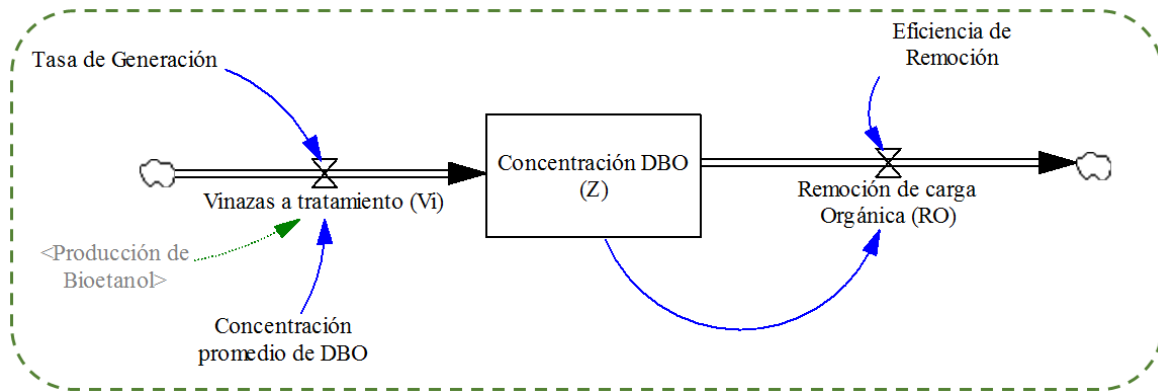


Figura 37. Diagrama Niveles y Flujos del indicador calidad de agua.

La ecuación para modelar este indicador está dada por:

$$\frac{dz}{dt} = Vi - RO.$$

Para la simulación del indicador, se partió como base de reducción de volumen hasta 1 litro de vinaza, y con una concentración promedio de DBO de 20.000 mg. De igual manera se generaron tres distintos escenarios a la condición inicial. La Figura 38a, muestra la simulación del sistema sin ninguna intervención, lo cual evidencia la alta descarga contaminante expresada en kg de DBO. En las Figuras 38 b y c. se muestran el comportamiento del indicador con una mayor eficiencia de remoción, atribuida al mejoramiento en las plantas de tratamiento, sin embargo, la tendencia de generación de vertimientos sigue siendo alta. En la Figura 38d. Se muestra un comportamiento con valores de generación mayores al estado inicial, suponiendo que la reducción de volumen de vinazas no fuera tan eficiente y con una tasa de remoción igual al estado inicial.

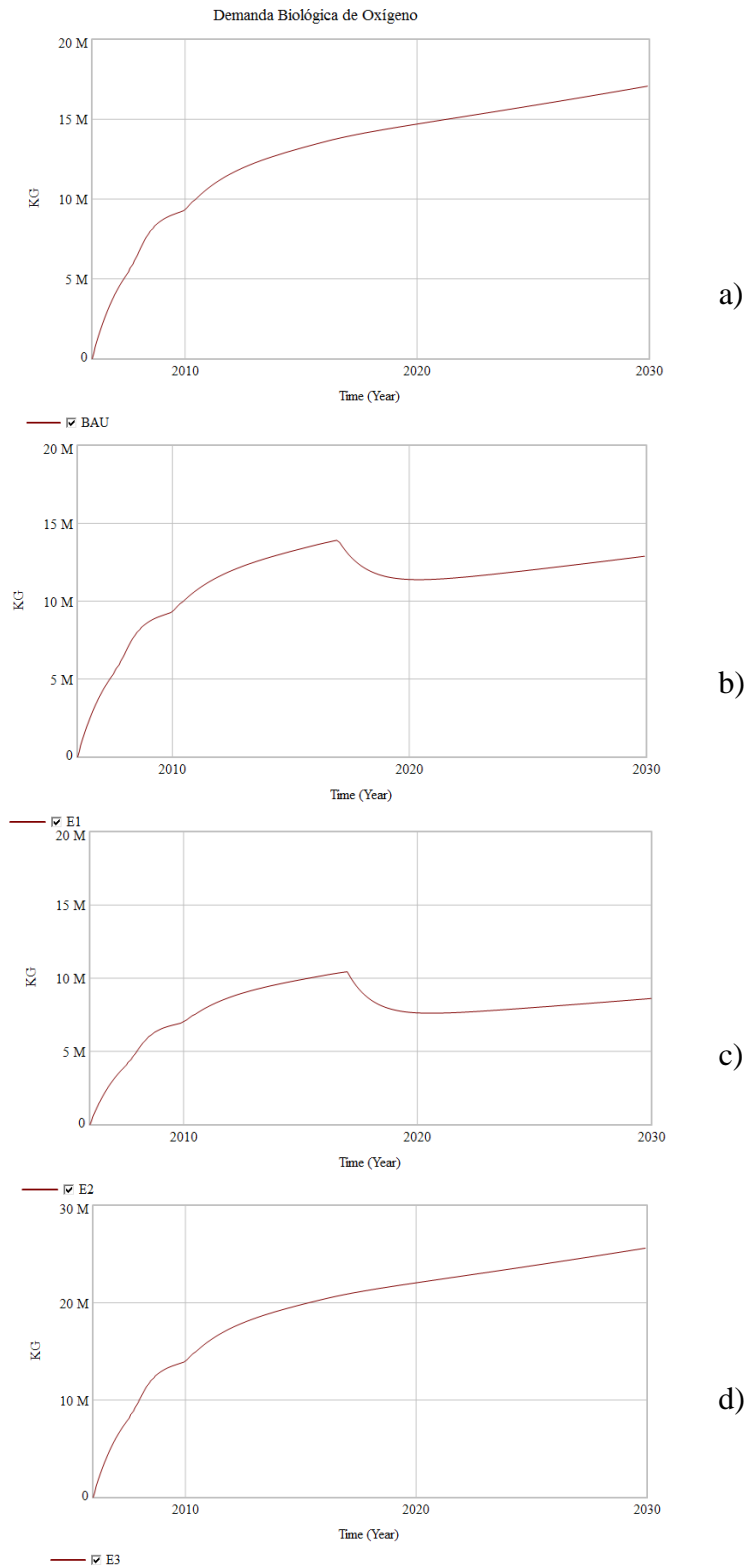


Figura 38. Simulación de Demanda Biológica de Oxígeno, con aumento de remoción.
 Nota: Los escenarios de cambio en umbrales de límites máximos permisibles de DBO, se asocian al efecto de la política nacional de vertimientos.

- Pilar Social.

c) **Modelo para el Indicador Empleo.**

Para la evaluación de este indicador, es necesario tener en cuenta la cantidad de empleos que se generan en relación a la cantidad de bioetanol de caña que se produce. Estos empleos se estiman por unidad de bioetanol producido. Para esto, se obtuvo información de la producción de la materia prima y del proceso de producción (FAO, 2015). Se parte de la idea que el aumento de producción de bioetanol debe incentivar una creación de vacantes en el sector, motivado por la diferencia con el número de empleos actuales, lo que genera el bucle de realimentación de la Figura 36.

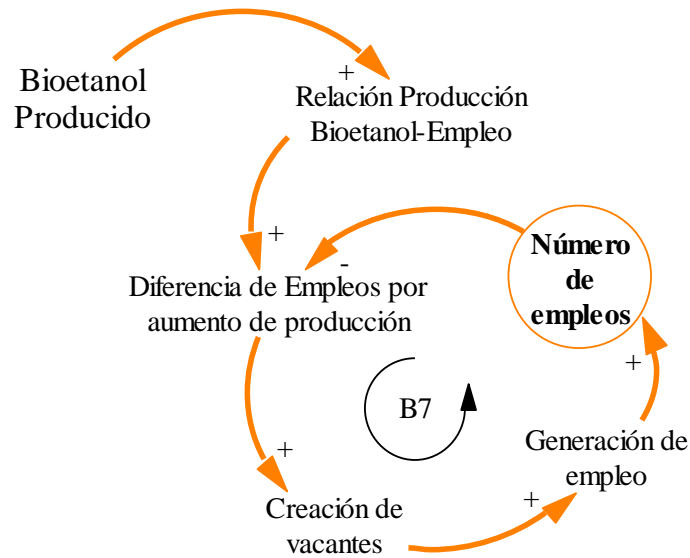


Figura 39. Diagrama Causal Indicador Empleos.

Esta estructura de realimentación, se encuentra asociada al diagrama causal de la cadena de suministro, en el mismo orden, El diagrama de Niveles y Flujos que representa el indicador empleos, se muestra en la Figura 40.

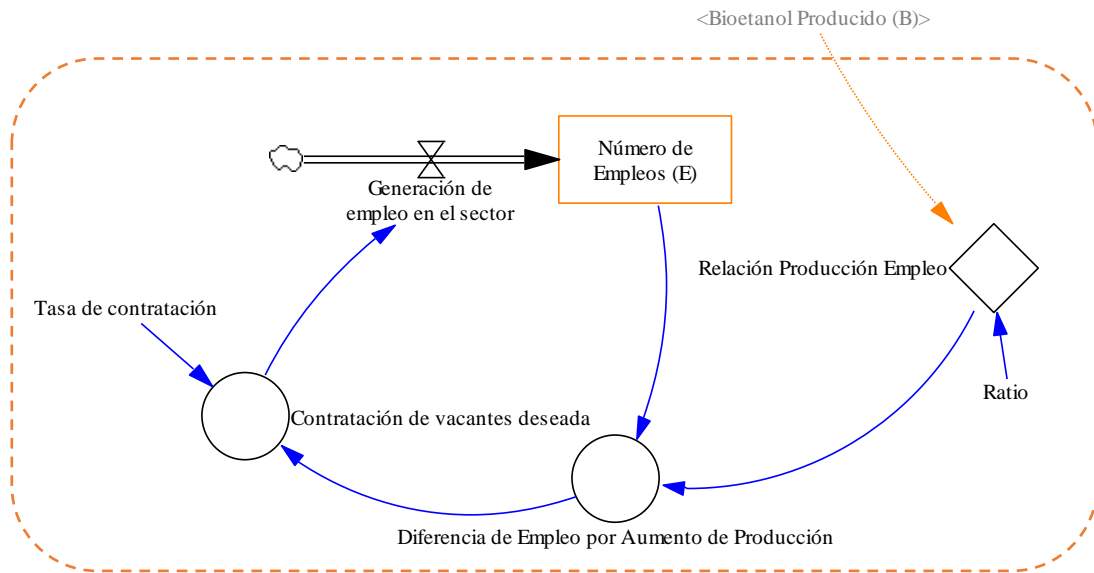
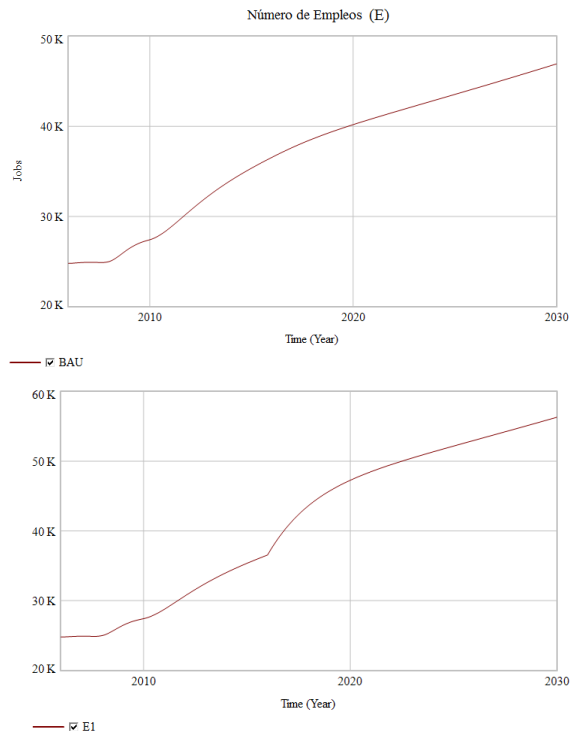


Figura 40. Diagrama Niveles y Flujos Indicador Empleos.

Para la simulación del indicador se partió de la información suministrada por (FAO, 2015) y (ASOCAÑA, 2012) con relación al número de empleos generados en la cadena de suministro de Bioetanol del año 2006 al 2010. De igual manera se generaron escenarios con aumento y disminución de la relación de empleos.



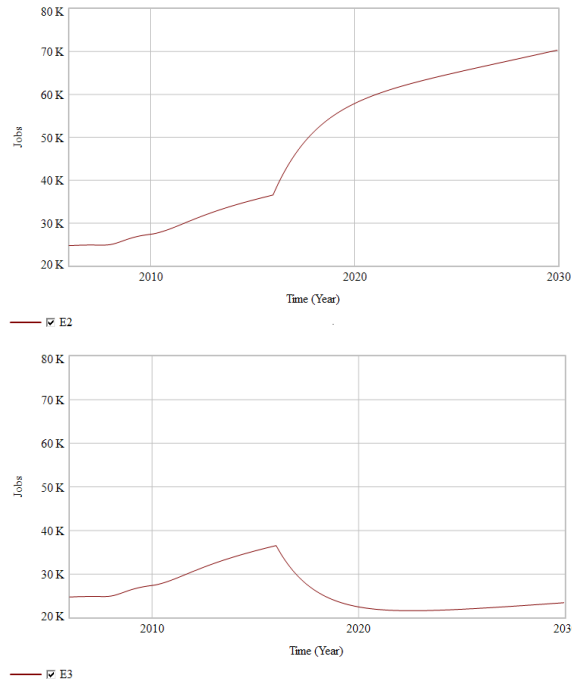


Figura 40 Simulación del Indicador empleos y cambios en la relación empleo-producción

d) Asignación y Tenencia de nueva tierra.

El sector azucarero colombiano se ha transformado, pasó de ser un sector linealmente integrado desde el cultivo hasta la producción industrial, a ser un sector crecientemente especializado en la generación de valor agregado industrial y comprador de la materia prima agrícola, es decir realiza intercambios comerciales con la región. Por ejemplo, entre 1960 y 1990, los ingenios redujeron del 75% al 24% el área de su propiedad sembrada de caña, mientras los proveedores pasaron de representar del 18% al 70% (CUE, 2012).

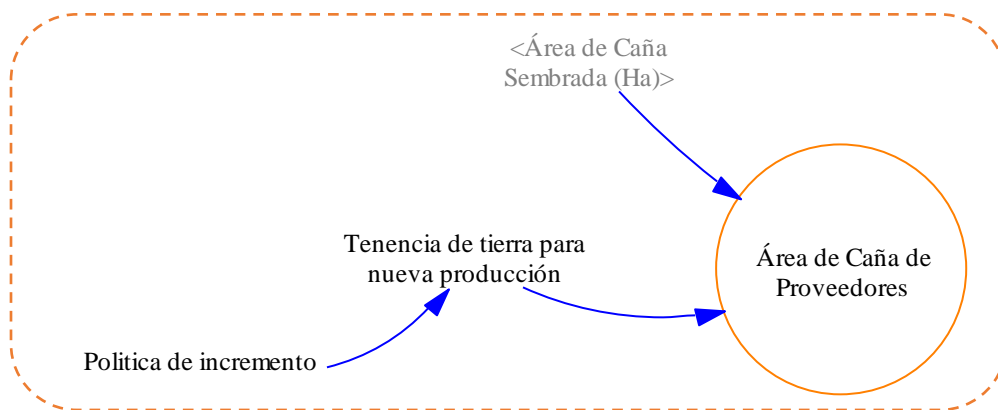


Figura 41. Indicador Tenencia de tierra para producción de bioetanol.

Hoy, la tenencia de tierra de los proveedores se encuentra entre el 74 y 75%. Para la simulación se partió con un porcentaje de tenencia del 74% para los granjeros locales, de igual manera se generaron escenarios donde se modifica este porcentaje para la producción de bioetanol. En la Figura 42, se observan los cambios en el comportamiento en el total de área de caña de azúcar. Esta relación de tenencia de cultivos de caña, permite un intercambio comercial entre las grandes compañías productoras y los cultivadores locales.

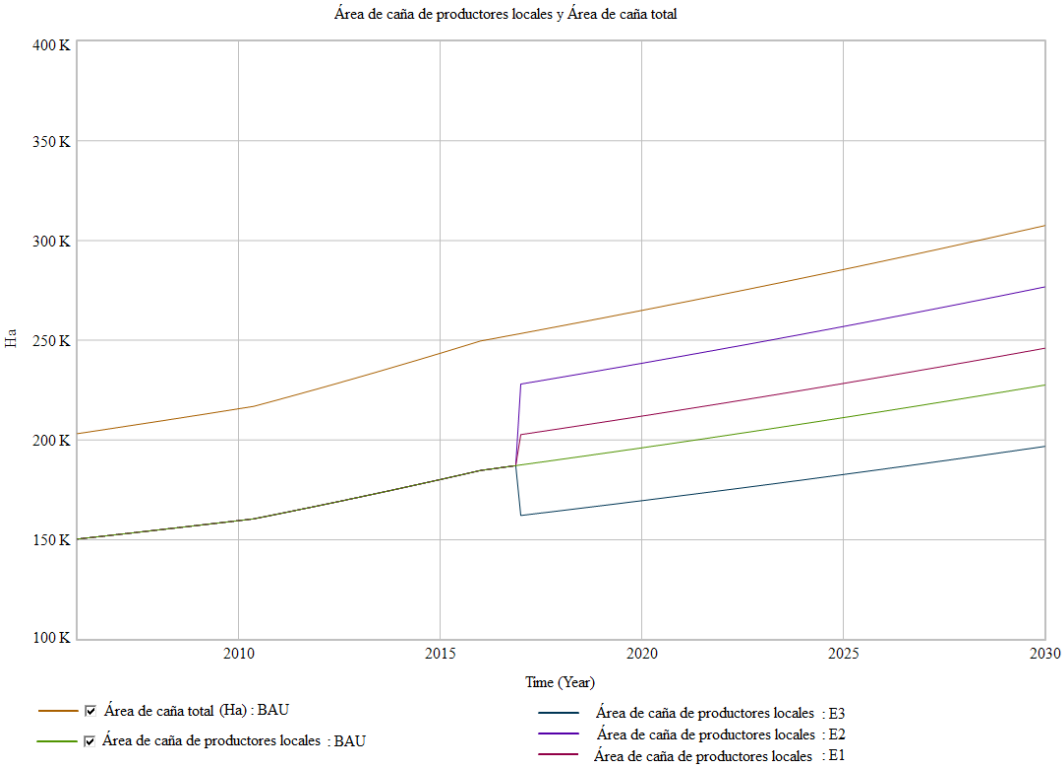


Figura 42. Simulación del Indicador Asignación y tenencia de tierra y cambios en el porcentaje.

Las simulaciones fueron integradas en una misma Figura, debido a los comportamientos similares.

La línea amarilla representa la cantidad de hectáreas total del comportamiento del sistema en el Business As Usual-BAU, es decir en cómo se comportaría el sistema habitual. La línea verde es la cantidad de hectáreas pertenecientes a los cultivadores locales. El E1, E2, E3, representan la cantidad de hectáreas de caña de los cultivadores locales, con cambios en el porcentaje de tenencia del total de hectáreas, del año 2017 en adelante.

- Pilar Económico

e) **Modelo para el Indicador Productividad.**

Para la evaluación de este indicador, es necesario tener en cuenta la relación que existe entre la cantidad de bioetanol que se produce, y la cantidad de hectáreas cultivadas. Para esto, se utilizó la información de los resultados de simulación de las variables bioetanol producido y hectáreas de caña. La productividad es el cociente entre los litros de bioetanol producidos y las hectáreas de caña sembradas. El diagrama de la Figura 43.

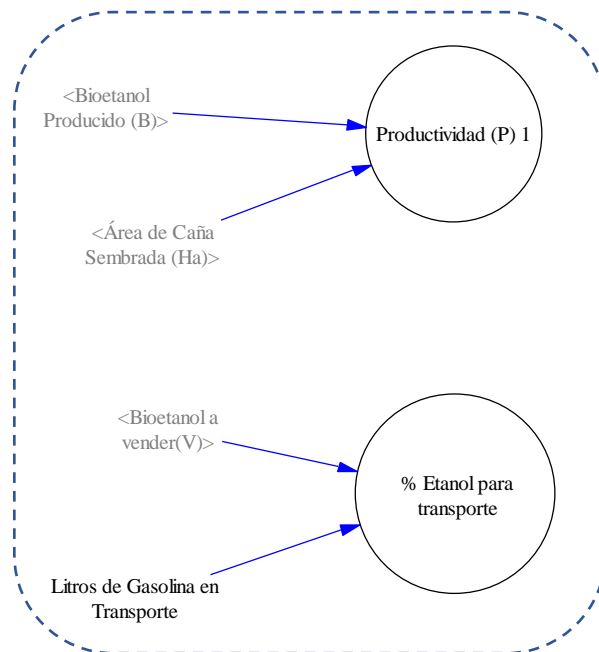
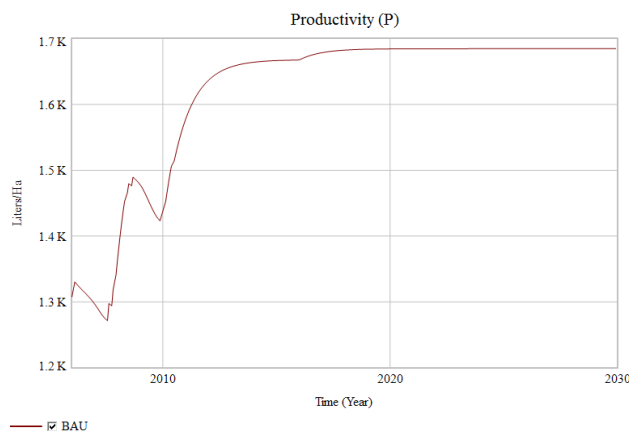


Figura 43. Diagrama Niveles y Flujos Indicadores Económicos.



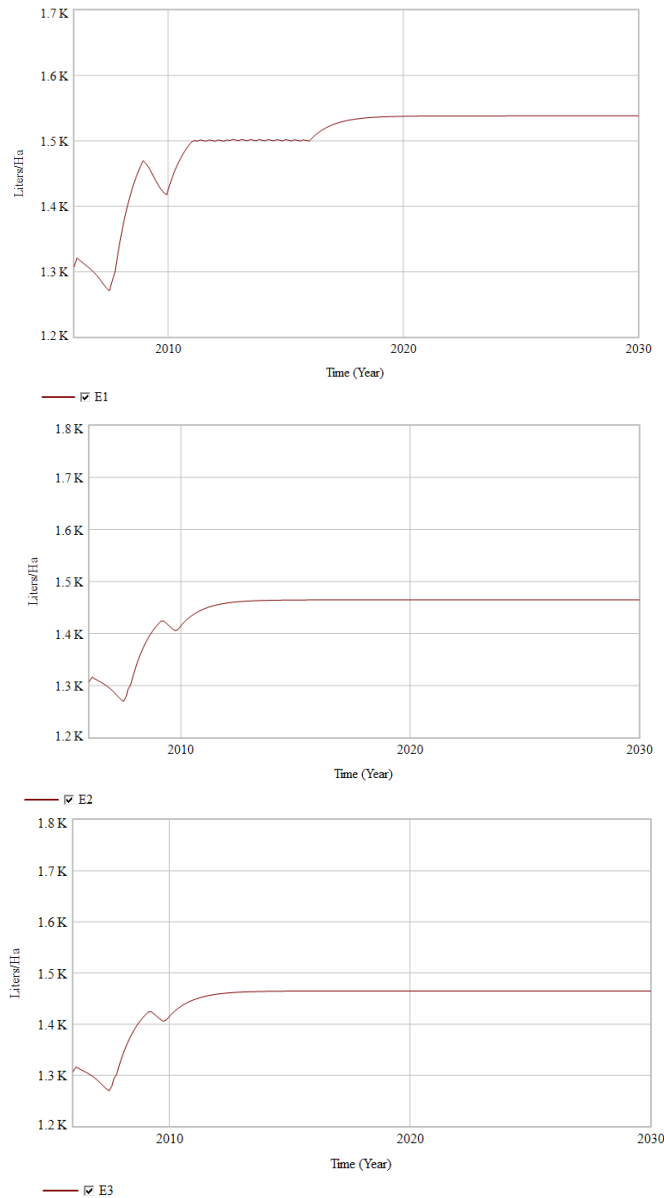


Figura 44. Simulación del indicador productividad.
Escenarios con variación del cultivo de caña y la tasa de producción de bioetanol.

f) Flexibilidad del uso de bioetanol.

Este indicador está directamente relacionado con la demanda de gasolina, debido a que al haber mayor demanda de gasolina y producción de bioetanol constante, disminuye la flexibilidad del bioetanol, es decir la capacidad de mantener el porcentaje de mezcla B10, se ve afectado. Los escenarios de este indicador E1 y E2 se basan en incrementos incontrolados de demanda de gasolina. El E3 plantea una disminución de la demanda, lo cual afectaría el porcentaje de mezcla de combustibles, cómo lo muestra la Figura 45.

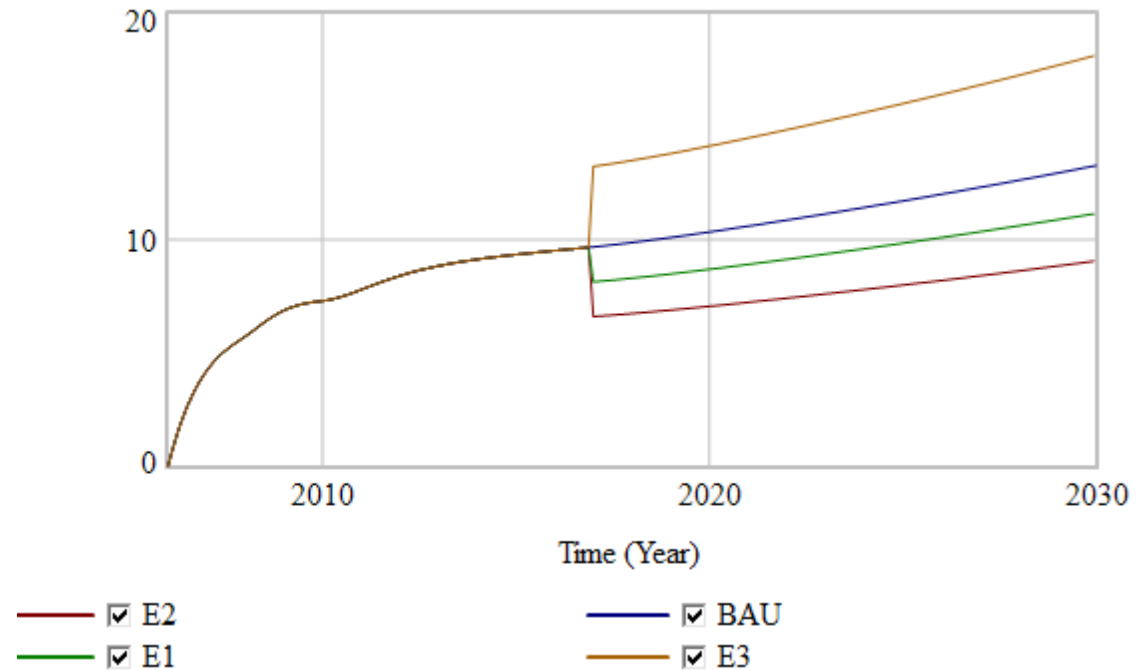


Figura 45. Simulación del indicador Flexibilidad del uso de bioetanol

5.3 Políticas y estrategias de Gestión.

Una vez modelado y simulado los indicadores de sostenibilidad, se discutió sobre la pertinencia de llevar a cabo una evaluación prospectiva con regiones objetivo, de esta forma, se escogieron tres de los indicadores modelados para aplicarles el marco propuesto en el Capítulo 3 y observar el cambio, la oportunidad y la adaptación a regiones de restricción y políticas de intervención.

5.3.1 Indicador Consumo de agua.

Para la evaluación de estrategias en el indicador consumo de agua, se tuvo en cuenta solo la actividad de consumo de agua en el cultivo de caña de azúcar, pues esta representa el 99,9% del total de consumo de agua en la cadena de suministro. Por lo tanto se establecieron tres escenarios de simulación donde se analizan tres técnicas de irrigación orientadas a reducción de consumo. De igual manera las restricciones de las regiones definidas se establecieron con base en las tasas de uso y concesiones estimadas para 2010 por la CVC (2008) y (Pérez et al, 2011), donde plantean un uso irracional a los valores superiores a 2Gm³.

- Técnicas de irrigación para la disminución del consumo de agua.

La cantidad de agua de riego depende de la técnica de irrigación. En general, los canales abiertos son empleados para irrigar agua a los cultivos. La frecuencia de riego es aproximadamente 5 veces al año y se aplica una cantidad anual de 5.000 a 9.000 m³ por ha. Sin embargo, si se instalan sistemas de tubería para riego, la cantidad de agua se puede reducir a 3.600 m³ (Cenicaña, 2010). Para la simulación del consumo de agua con distintas técnicas de irrigación se utilizó información real del sector la cual se muestra en la Tabla 2 y Tabla 11. (CUE 2012).

Tabla 11. Información sobre técnicas de ahorro de agua.

Estrategia de ahorro	Descripción Técnica de ahorro	4 riegos/ año	% Ahorro
NA	BAU-Business As Usual	9000 m ³	NA
Ahorro 1	CAR (Control Administrativo de Riego)	7200 m ³	20
Ahorro 2	CAR y Surco Alterno	6300 m ³	30
Ahorro 3	CAR, Surco Alterno y Tubo Con Compuerta	3600 m ³	60

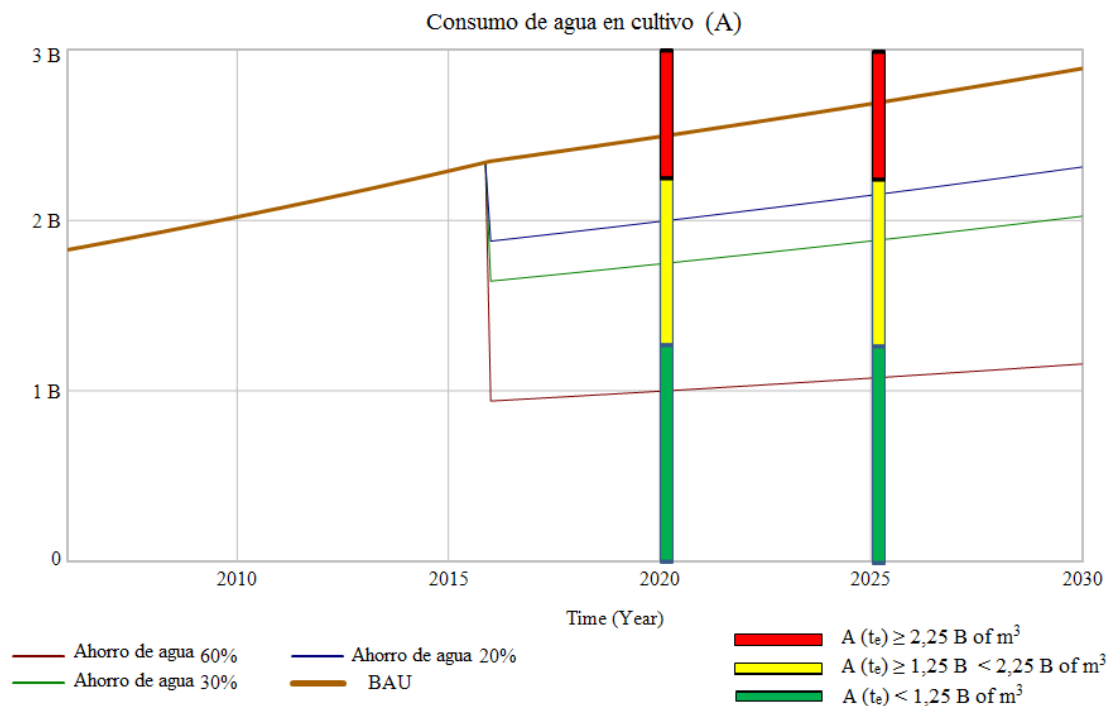


Figura 45. Evaluación prospectiva del indicador consumo de agua.

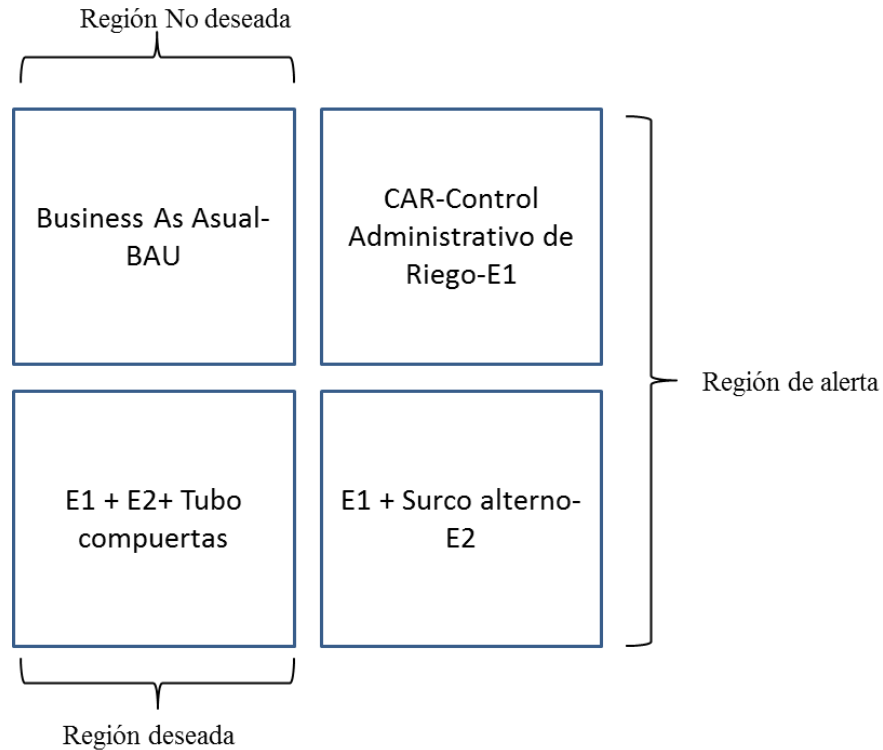


Figura 46. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador agua.

Los resultados de la evaluación del indicador Consumo de agua, muestran que la intervención del sistema con la implementación de las estrategias de ahorro, permitiría mejorar el panorama y conduciría al sistema dentro de la región deseada, pero únicamente para el sistema que incluya las estrategias de ahorro 3 (Ver Figura 46), pues su evolución temporal se encuentra en el escenario Deseado en el intervalo de evaluación $[t_e, t_f] = [2020, 2025]$. Cumpliendo con lo propuesto en el Capítulo 3, como evaluación prospectiva.

5.3.2 Indicador Empleos

Para la evaluación de políticas del indicador empleos, se tuvo en cuenta los empleos totales y su ratio empleos-litros de bioetanol producido. Se establecieron tres escenarios de simulación donde se analizan políticas de incremento de empleos.

Tabla 12. Descripción de escenarios de indicador Empleo.

Escenario	Descripción del escenario	Ratio empleo/litro de Bioetanol	Cambios en el ratio
NA	BAU	$9,333.10^{-5}$	NA
E1	Aumento de empleos directos Agrícolas	$11,196.10^{-4}$	20%
E2	E1+ Empleos en la producción+ Empleos Posconflicto	$13,995.10^{-4}$	50
E3	Afectación por tecnología	$4,655.10^{-5}$	-50

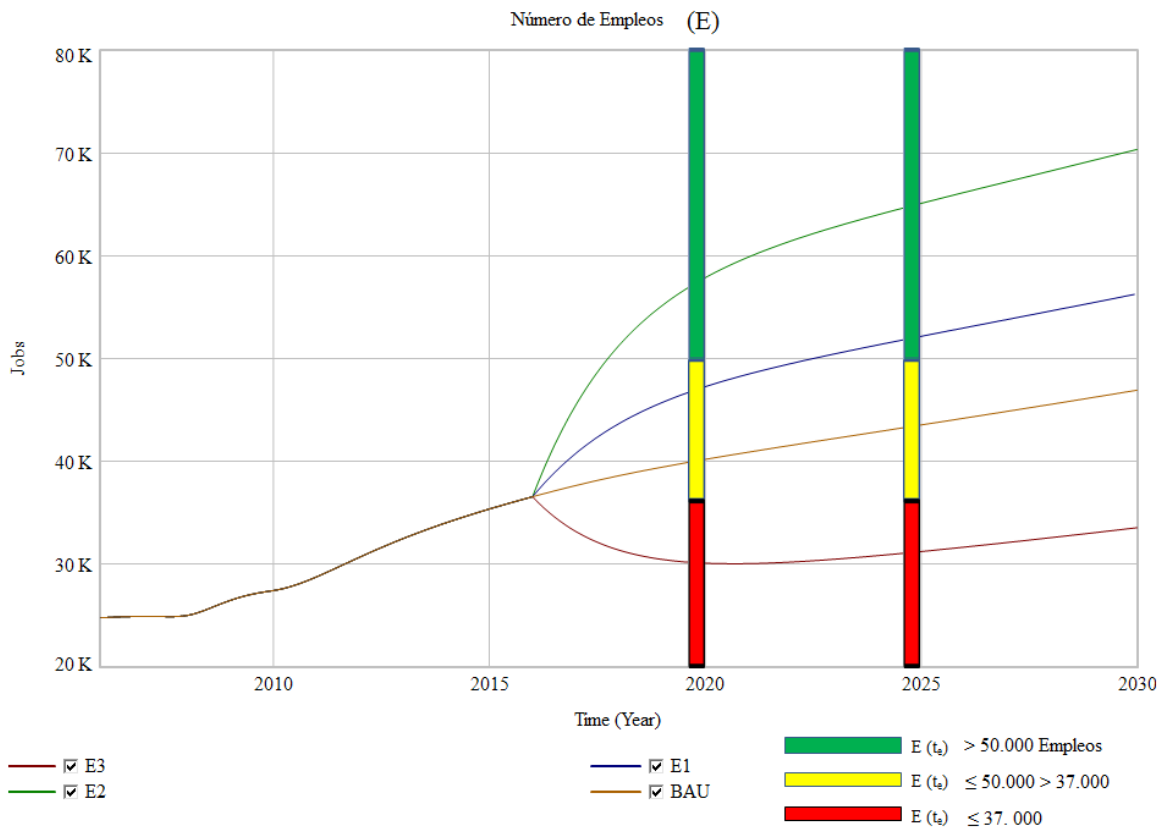


Figura 47. Evaluación prospectiva del indicador Empleos.

Los resultados de la evaluación del indicador Empleo, sin ninguna intervención de políticas del gobierno, muestran que con las condiciones iniciales planteadas y con el incremento de la producción de bioetanol, se mantendría dentro de una región de alerta para el intervalo de evaluación. De esta forma, es necesaria la implementación de políticas sectoriales del gobierno para incrementar el número de empleos en la producción de bioetanol, así como monitorear cual es la relación que existe entre la cantidad de bioetanol producido o

incremento de producción y la generación de nuevas oportunidades de empleo. Con el objetivo de poder hablar de beneficios sociales del sector en la región.

Los resultados de la evaluación del indicador Empleos, muestran una mejoría en la evolución temporal, cuando se implementó en el modelo, una política que busca el incremento en un 20% y 50% de los empleos evaluados en el $[t_e, t_f] = [2020, 2025]$. Definiendo como Escenario Deseado la cantidad más de 50.000 empleos, generados por la producción de entre 470 y 500 millones de litros de bioetanol/año. En la Figura 47 se observa la evaluación con las 3 políticas.

Se concluye que con la implementación de las políticas del E2, se permitiría mejorar el panorama y conduciría al sistema dentro de la región deseada propuesta, Figura 48.

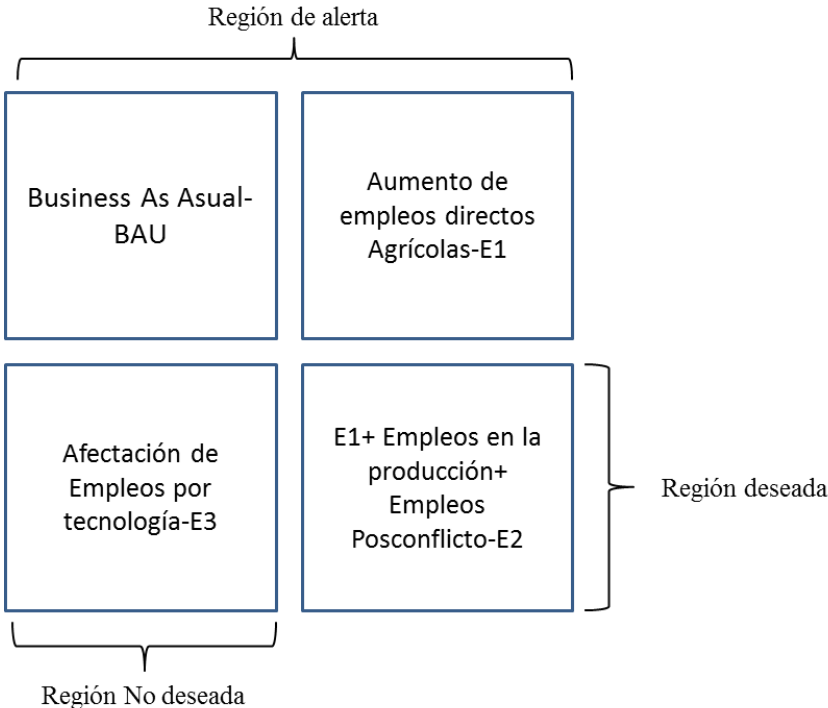


Figura 48. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador empleos.

5.3.3 Calidad de Agua-DBO

Para la evaluación de políticas del indicador Calidad de agua, medido en términos de kilogramos de DBO, se modificó el modelo inicial para la evaluación de la tendencia de crecimiento de este tipo de contaminante. Para estimar las descargas netas a los cuerpos de agua superficial se planteó el siguiente modelo, el cual incluye mejoras en la eficiencia con un determinado tiempo de implementación y una medición del DBO vertido anual. Este DBO vertido se le aplica las restricciones de las regiones propuestas.

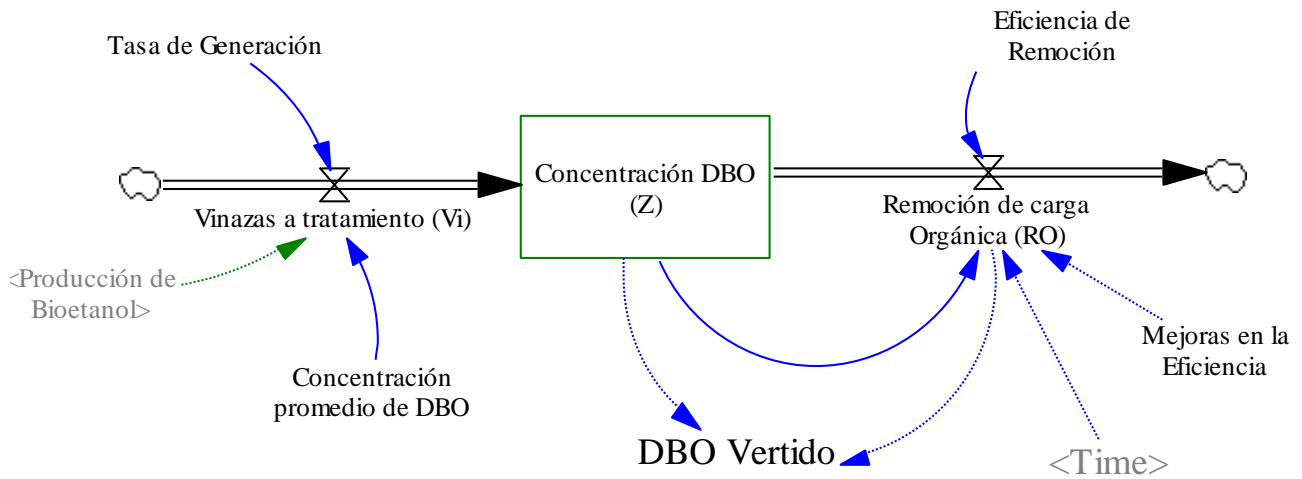


Figura 49. Diagrama de Niveles y Flujos del indicador agua, con implementación de políticas.

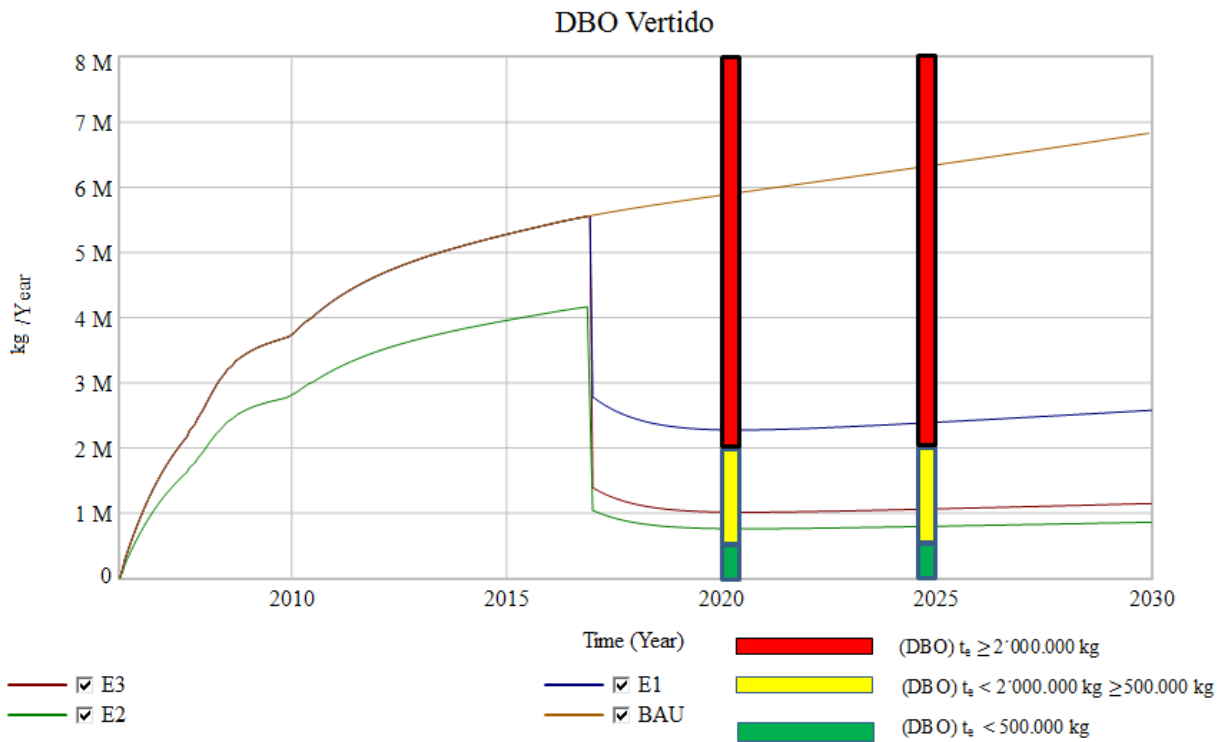


Figura 50. Evaluación prospectiva del indicador Calidad de Agua.

Tabla 13. Información sobre políticas de incremento de umbrales de remoción de Demanda Biológica de Oxígeno.

Nota: Estas políticas están orientadas a ser más estrictas para que se implementen mejoras en la eficiencia de remoción.

Escenario	Descripción de la política	Volumen de generación de vinazas (Litros de vinaza/Litros de Bioetanol)	Promedio de Descarga anual (kg/litro de Vinaza)	% Eficiencia
BAU	Condición Inicial	1/1	0.02	60
E 1	Mejoras en el eficiencia de remoción	1/1	0.02 kg	80
E 2	Reducción del promedio de descarga y Mejoras en el eficiencia de remoción	1/1	0.15 kg	90
E 3	Aumento de volumen de generación+ eficiencia inicial	1,5/1	0.02 kg	60

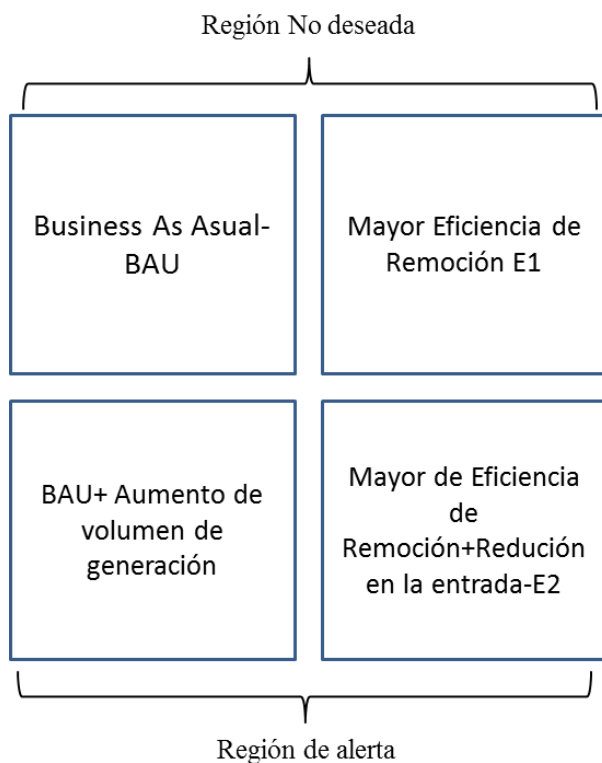


Figura 51. Escenarios para analizar el impacto de las estrategias y su viabilidad en el indicador Calidad de Agua.

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones generales

En esta tesis Doctoral, se construyó un modelo de la cadena de suministro de bioetanol, validado y calibrado, mediante el cual se logró la vinculación de las variables que representan los seis indicadores de sostenibilidad utilizados en la investigación. Esto se realizó con la metodología de Dinámica de Sistemas, fortaleciendo así la premisa que la Dinámica de Sistemas es acorde para cadenas de suministro y para mercados nacionales como el abordado. Se logró modelar los seis indicadores de sostenibilidad y evaluar escenarios bajo distintas decisiones. De igual manera, la necesidad de identificar regiones de sostenibilidad o regiones objetivo del estado de los indicadores, permitió la integración de los conceptos de cambio necesidad y adaptación expuestos en Teoría de Viabilidad, estos conceptos plantean conjuntos de restricciones al comportamiento de una variable, estas restricciones permiten definir escenarios tendenciales y tiempos de evaluación, a esta integración metodológica se le denominó evaluación prospectiva de sostenibilidad, siendo esto una contribución novedosa para el estudio de la sostenibilidad en cualquier campo.

Las simulaciones de la cadena de suministro de bioetanol y los indicadores de sostenibilidad, fueron realizadas con el software Vensim Ple 7.1 y el Software Vensim Plus, a partir de ellas se ha logrado estudiar y comprender el sistema y su afectación crítica a dos indicadores ambientales específicamente. Así, es posible afirmar que, si el cultivo de caña de azúcar sigue en tendencia de crecimiento como el actual, el consumo de agua y huella hídrica de este sector será muy elevado. Así mismo el impacto sobre la calidad de agua afectada por la descarga de vertimientos con alta carga de DBO, genera dudas sobre la actual normativa de límites máximos permisibles de los vertimientos a aguas superficiales. Dando así, el inicio de la discusión para realizar controles más rigurosos de las autoridades ambientales sobre este sector industrial.

Las políticas de gestión integradas al modelo tomadas de la normativa Colombiana y de información del mercado nacional, permiten reforzar la idea de necesidad de una política más sostenible y más restrictiva para este sector.

- **Sobre la metodología**

Este trabajo permitió la integración de Dinámica de Sistemas y conceptos de Teoría de Viabilidad en un marco metodológico para la evaluación de sostenibilidad como el presentado en la Figura 15. Se habla de oportunidad, cuando existe una inclusión diferencial que se obtuvo del modelamiento con Dinámica de Sistemas y dadas unas condiciones de restricción que fueron definidas sobre las variables que representan los indicadores, dan lugar a regiones prospectivas delimitadas (Deseado, No deseada y Alerta). Cuando definimos regiones objetivo para la evolución de los estados del sistema estamos hablando de Necesidad. De igual manera, al hacer cambios o arreglos de parámetros que representan reglas de decisión sobre el sistema, para definir cuáles de estos satisfacen las restricciones viables para un intervalo de tiempo de evaluación, nos referimos a adaptación. Es este punto de vista de la Teoría de Viabilidad la que inspira la metodología propuesta para evaluación de sostenibilidad.

6.2 Recomendaciones a la política nacional de biocombustibles.

Como se ha mencionado en esta tesis, para una evaluación exitosa de sostenibilidad, en el sector de bioetanol y otros biocombustibles, es necesario la definición de objetivos claros tanto de incremento de producción como objetivos de sostenibilidad es decir que, si se va a aumentar la producción, cultivos agrícolas para biocombustibles y capacidad instalada de producción, debe medirse y modelar escenarios futuros para conocer cuál sería la afectación de los recursos naturales o de los indicadores de sostenibilidad del GBEP. Se puede decir que, Colombia no tiene unos objetivos claros sobre sostenibilidad de la producción de bioetanol de caña de azúcar a nivel nacional y es imperativo que se defina política nacional orientada a desarrollar esquemas de producción sostenible partiendo de las diferentes materias primas que hoy se están utilizando y las futuras materias primas que el país está considerando utilizar.

Los hallazgos sobre el indicador consumo de agua, evidencian la necesidad de orientar políticas con asignación equitativa de este recurso, es decir, que el país logre desarrollar e implementar una política basada en escenarios prospectivos de consumo, para no generar riesgos de desabastecimiento.

De igual manera, para el indicador calidad de agua, pues se recomienda que la política actual de vertimientos sea mucho más estricta para este sector, pues los escenarios prospectivos, muestran que la descarga de vertimientos con altos niveles de DBO permitidos, continuarán en aumento, aun siendo legítima y validada por la resolución 631/2015. Es así como se debería mejorar el umbral permitido en las nuevas orientaciones políticas.

El principal incentivo para la producción de alcohol carburante en Colombia está dado por el marco regulatorio del programa de oxigenación de gasolinas, el cual obliga el uso de mezcla de bioetanol y gasolina en un 10 % y 90% respectivamente, sin embargo, dado el incremento de demanda y la capacidad instalada actual, este porcentaje ha tenido que oscilar entre 8 y 10%, lo cual continua incentivando al incremento de producción de bioetanol de caña en el país, principalmente de caña de azúcar donde ya se cuenta con toda la infraestructura para hacerlo. Sin embargo, para mejorar esta flexibilidad del uso de bioetanol en el mercado nacional, se debe tener en cuenta la demanda de gasolina para el parque automotor, la capacidad instalada de producción de bioetanol, si se desea mayor flexibilidad, es necesario aumentar la capacidad instalada, pero teniendo en cuenta las consideraciones anteriores sobre consumo de agua y crecimiento de materia prima.

6.3 Trabajos futuros.

Se recomienda a trabajos futuros, poner un límite al crecimiento de la producción de bioetanol dentro del modelo, teniendo en cuenta las hectáreas disponibles en la localización geográfica, es decir realizar un modelamiento espacial integrado al modelamiento temporal. De igual manera, para el recurso hídrico, es decir, plantear hipótesis sobre los límites máximos permisibles de volumen de agua que podría extraer este tipo de industria, para a partir de allí definir el límite de crecimiento basado en el recurso hídrico, esto, tendría implicaciones fuertes sobre la forma en que se realiza la planeación del desarrollo y las políticas, puesto que el diseño de políticas tendría que hacerse basado en los aspectos ambientales y recursos naturales disponibles.

El modelo construido en esta tesis, puede reproducirse para evaluar diferentes políticas en el ámbito ambiental, social y económico.

6.4 Divulgación de Resultados

6.4.1 Artículos en Congresos.

- *Sostenibilidad en la Cadena de Suministro de Bioetanol*. XXXIV Congreso InterAmericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-AIDIS **Monterrey- México- 2014**
- *Green Supply Chain of Bioethanol, System Dynamics Approach, Colombian Case*. Global Cleaner Production and Sustainable Consumption Conference, **Elsevier Barcelona-España, - 2015**.
- *Evaluación de Indicadores Ambientales en la Producción de Biocombustibles*. Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. **Cartagena- 2015**.
- *Sustainability in Biofuels Supply Chain, a framework for Colombia*. Congreso ACODAL-AIDIS **Cartagena-Colombia- 2016**
- *Model for Assessment Sustainability Indicators in biofuels*. 35th International Conference of the System Dynamics Society. **Cambridge, MA-United States-2017**
- *4 IIWEE International and Interdisciplinary Workshop on Mathematical Modeling of Environment and Evolution of Social and Life Processes* **Manizales- Colombia- 2017**
- *Modelado de Indicadores de Sostenibilidad en Producción de Bioetanol XV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*, **Cartagena-Colombia- 2017**

6.4.2 Artículos en revistas.

- *Aproximación Sistémica de la Sostenibilidad en la producción de Bioetanol*. RIAA-Revista *de Investigación Agraria y Ambiental* (2018).
- *Tendencias del consumo de agua en la producción de bioetanol en Colombia*. *Revista Ambiente y Desarrollo* (2018).

- A Framework for assessment sustainability indicators in biofuels. *Journal of Energy for sustainable development* (En revisión).
- *Sustainability assessment in Supply Chain of Bioethanol. The need for sustainable policies in Colombia.* Sometido a *Energy Policy* (En Construcción).

Referencias.

1. Acheampong, M., Ertem, F.C., Kappler, B., Neubauer, P. (2017). Renewable and Sustainable Energy Reviews. 75. 927–937 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.074>
2. Acosta-Michlik L, Lucht W, Bondeau A, Beringer T. (2011) Integrated assessment of sustainability trade-offs and pathways for global bioenergy production: framing a novel hybrid approach. *Renew Sustain Energy Rev*;15:2791–809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.011>.
3. Afgan NH, Carvalho MG, Hovanov NV. (2000) Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy* 2000;28:603–12. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00045-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00045-8).
4. Ahi, P. y Searcy C. (2015) Assessing sustainability in the supply chain: A triple bottom line Approach. *Applied Mathematical Modelling*. Vol 39 pg. 2882–2896
5. Aracil, J., Gordillo, F. J.(1997) *Dinámica de Sistemas*. Madrid: Alianza Editorial.
6. Armendáriz, V., Armenia, S., & Atzori, A. S. (2016). Systemic Analysis of Food Supply and Distribution Systems in City-Region Systems—An Examination of FAO’s Policy Guidelines towards Sustainable Agri-Food Systems. *Agriculture*, 6(4), 65.
7. Asocaña (2014) *Informe anual 2013 - 2014*. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Cali, Colombia Asocaña.
8. Asocaña (2016) *Informe anual 2015 - 2016*. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Cali, Colombia Asocaña.
9. Asocaña. (2012). *Informe anual 2011 - 2012*. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia Cali, Colombia.
10. Aubin, J., (2011). *Viability Theory. New Directions*. Second edition. Ed Springer.
11. Banos-González, I., Martínez-Fernández, J., Esteve-Selma, M. (2016) Dynamic integration of sustainability indicators in insular socio-ecological systems. *Ecological Indicators*, Volume 67, August. Pages 565–576 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.021>
12. Barisa, A. , Romagnoli, F. , Blumberga, A. , Blumberga, D. (2015.) Future biodiesel policy designs and consumption patterns in Latvia: A system dynamics model. *Journal of Cleaner*

Production. Vol 88, February. 71-82

13. Barlas, Y. (1989). Multiple tests for validation of system dynamics type of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 42 (1) (1989), pp. 59–87
14. Bautista, S.C. Sustainability Assessment of Biodiesel Production in Colombia (2015). Doctoral Thesis Universidad Nacional de Colombia. School of Engineering, Chemical and Environmental Engineering Department.
15. Buchholz T.S, Volk T.A, Luzadis V.A.(2007) A participatory systems approach to modeling social, economic, and ecological components of bioenergy. *Energy Policy* 2007;35:6084–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.020>.
16. Cárdenas L. (2015). Plataforma para la evaluación de políticas de mitigación de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión. Medellín.
17. Cavicchi B. (2016) Sustainability that backfires: the case of biogas in Emilia Romagna. *Environ. Innov. Soc. Transit*, vol. 21, pp. 13-27.
18. Chapman, A., & Darby, S. (2016). Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling: Rice agriculture in the Mekong Delta's An Giang Province, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 559, 326-338.
19. Charles, M.B., Ryan, R., Ryan, N., Oloruntoba, R., (2007) Public policy and biofuels: The way forward? *Energy Policy*, 36, 1, 2008, Page 495
20. Chauvet , M. y González, R. (2008). Biocombustibles y cultivos biofarmacéuticos: ¿oportunidades o amenazas? *Revista El Cotidiano, Redalyc*, 23(147), 51-61.
21. Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES (2008). Lineamiento de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. Departamento Nacional de Planeación, Bogotá.
22. Consorcio CUE, (2012). Capítulo II: Estudio ACV - Impacto Ambiental. In: Consorcio CUE, Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo, Ministerio de Minas y Energía, Medellín.
23. Cui-xia, W. A. N. G. (2015). Strategy simulation analysis for the scale operation of ecological agriculture using system dynamics. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 12, 018.
24. Dacea, E., Muiznieca, I., Blumberga, A., Kaczala F. (2015). Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions — Application of system dynamics modeling for the case of Latvia *Science of the Total Environment* 527–528 80–90 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.088>
25. Demczuk, A., Padula, A.D. (2017). Using system dynamics modeling to evaluate the feasibility

- of ethanol supply chain in Brazil: The role of sugarcane yield, gasoline prices and sales tax rates. *Biomass and Bioenergy* 97 186-211 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.021>
26. Diaz-Chavez R. A. (2016). Sustainability Considerations for the Future Bioeconomy, Developing the Global Bioeconomy: Technical, Market, and Environmental Lessons from Bioenergy, Pages: 69-90, ISBN: 9780128052907
 27. Diaz-Chavez, R. A. (2011). Assessing biofuels: Aiming for sustainable development or complying with the market? *Energy Policy* 39, 5763–5769 doi:10.1016/j.enpol.2011.03.054
 28. Ding, Z.K., Yi, G.Z., Tam, V.W., Huang, T.Y., (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Manag.* 51, 130e141.
 29. Dresner, S., 2002. *The Principles of Sustainability*. Earthscan, UK 200pp.
 30. Elghali L, Clift R, Sinclair P, Panoutsou C, Bauen A. (2007) Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems. *Energy Policy* 2007;35:6075–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.036>.
 31. Ellis, R. D. and R. E. Merry, Eds. (2007). Sugarcane, second edition: Chapter 5 sugarcane agriculture. Oxford, UK.
 32. Esteves, B. (2013). Beyond common place biofuels: Social aspects of ethanol. *Energy Policy* 57(2013)355-362
 33. Evans A, Strezov V, Evans T. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renew Sustain Energy Rev* ;13:1082–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>.
 34. Nasiri, F. Mafakheri, F., Adebajo, D., Haghghat, F. (2016) Modeling and analysis of renewable heat integration into non-domestic buildings-the case of biomass boilers: a whole life asset-supply chain management approach, *Biomass Bioenergy* 95. 244–256.
 35. Fedebiocombustibles. (2016). Cifras Informativas del Sector Biocombustibles. [En línea] Etanol de caña anhidro en 2016. [Citado 30 de junio de 2016].
 36. Fedesarrollo Colombia. (2012) Garcia, H., Calderon, L. Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. Fedesarrollo. [Consultado el 1 de agosto de 2013] Disponible en < <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/Evaluaci%C3%B3n-de-la-pol%C3%ADtica-de-Biocombustibles-en-Colombia.pdf>>
 37. Flórez, A.M. (2011) Modelo regional de producción y transporte de biocombustibles en Colombia. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Sistemas Medellín, Colombia.
 38. Forrester, Jay Wright (1961), Reprint- 2013. *Industrial Dynamics*. Martino Fine Books.

39. Foteinis, S., Kouloumpis, V., Tsoutsos, T. (2011) Life cycle analysis for bioethanol production from sugar beet crops in Greece. *Energy Policy* 39, 4834-4841
40. Franco, C. J., Zapata, S., & Dyner, I. (2015). Simulation for assessing the liberalization of biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 298-307.
41. Ghisolf, V., Chaves, G., Siman, R., Xavier, L., (2016). System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: a perspective for social inclusion of waste pickers. *Waste Manage.* 60, 14–31.
42. Global Bioenergy Partnership-GBEP (2011). The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy. Rome: Global Bioenergy Partnership; 2011.
43. Glyn, J., Ed. (2007). Sugarcane, second edition. Oxford, UK.
44. Gnansounou E. (2011). Assessing the sustainability of biofuels: a logic-based model. *Energy* 2011;36:2089–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.027>.
45. Golroudbary SR, Zahraee SM.(2015). System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simul Model Pract Theory* 2015;53:88–102.
46. GRI – Global Reporting Initiative, (2002b). Sustainability Reporting Guidelines 2002 on Economic and Social Performance. Global Reporting Initiative, Boston, USA
47. Ha, T. M., Bosch, O. J., Nguyen, N. C., & Trinh, C. T. (2017). System dynamics modelling for defining livelihood strategies for women smallholder farmers in lowland and upland regions of northern Vietnam: A comparative analysis. *Agricultural Systems*, 150, 12-20.
48. Hayashi T., Ierland E., Zhu, X. (2014) A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators. *Biomass and Bioenergy* Vol 6 6 pg. 70 -80
49. Herreras, S., Eijck, J., Pereira, M., Guilhoto, J. Walter, A., Faaij, A. (2013) Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane-ethanol production by means of inter-regional Input-Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 290-316
50. Hidayatno, A., Rahman, I., & Muliadi, R. (2015) Policy analysis of the jakarta carbon mitigation plan using system dynamics to support decision making in urban development–options for policymakers. *International Journal of Technology*, 5: 886-893
51. Hill, Jason, Erik Nelson, David Tilman, Stephen Polasky, and Douglas Tiffany. (2006). “Environmental, Economic, and Energetic Costs and Benefits of Biodiesel and Ethanol Biofuels.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (30): 11206–11210. doi:10.1073/pnas.0604600103.

52. Inghels, D., Dullaert, W., Raa, B., Walther, G.(2016). Influence of composition, amount and life span of passenger cars on end-of-life vehicles waste in Belgium: A system dynamics approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol 91, September, 80-104.
53. Janssen, R., Rutz, D. (2011). Sustainability of biofuels in Latin America: Risks and opportunities. *Energy Policy* 39, 5717–5725 doi:10.1016/j.enpol.2011.01.047
54. Liu, X., & Zeng, M. (2017). Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 782-788.
55. Mangoyana R., Smith, T. Simpson, R. (2013) A systems approach to evaluating sustainability of biofuel systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25(2013)371-380
56. Markevicius, A., Katinas, V., Perednis, E., Tamasauskienė, M. (2010) Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 3226-3231
57. Mata, T., Martins, A., Sikdar, S., Costa, C., Martins, A. (2013). Sustainability analysis of biofuels through the supply chain using indicators. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 3. Pag 53-60 <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2013.06.001>
58. Mata, T., Martins, A., Sikdar, S., Costa, C.(2011) Sustainability considerations of biodiesel based on supply chain analysis. *Clean Techno Environ Policy*; 13:655–71.
59. Monasterolo, I., Pasqualino, R., Janetos, A. C., & Jones, A. (2016). Sustainable and Inclusive Food Systems through the Lenses of a Complex System Thinking Approach—A Bibliometric Review. *Agriculture*, 6(3), 44.
60. Musango, J., Brent, A., Amigun, B. Pretorius, L., Muller, H. (2012). A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa. *Technovation* 32.639–651 <http://dx.doi.org/10.1016/j.technovation.2012.06.003>
61. Nabavi, E., Daniell, K., Najafi, H. Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability? *Journal of Cleaner Production* 140 (2017) 312- 323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.032>
62. Ness, B., Urbel Piirsalu, E., Anderberg, S., Olsson, L., 2007. Categorising tools FOS sustainability assessment. *Ecological Economics* 60, 498–508.
63. Nigam P.S., Singh A. (2011) Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog Energy Combust Sci* 2011;37:52–68
64. OECD – Organization for Economic Cooperation and Development, 2002. An Update of the OECD Composite Leading Indicators. Short-term Economic Statistics Division, Statistics Directorate/OECD.

65. Pacini, H., Assuncao, L., Dam, J.V., Toneto jr, R. (2013) The Price for biofuels sustainability. *Energy Policy*, 59, pg 898-903
66. Procter, A., Bassi, A., Kolling, J., Cox, L., Flanders, N., Tanners, N., & Araujo, R. (2017). The effectiveness of Light Rail transit in achieving regional CO2 emissions targets is linked to building energy use: insights from system dynamics modeling. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(5), 1459-1474.
67. Robalino-López, A., Mena-Nieto, A., García-Ramos J.E. System dynamics modeling for renewable energy and CO2 emissions: A case study of Ecuador. *Energy for Sustainable Development* 20 (2014) 11–20 <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.02.001>
68. Sanches-Pereira, A., Gomez, M.F., (2014). The dynamics of the Swedish biofuel system towards a vehicle fleet independent of fossil fuels. *J. Cleaner Production*. Volume 96, June. 452-466.
69. Sánchez, O. (2008) Síntesis de Esquemas Tecnológicos Integrados Para la Producción Biotecnológica de Alcohol Carburante a Partir de Tres Materias Primas Colombianas. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Química Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
70. Scarlat N., Dallemand J.F. (2011). Recent developments of biofuels/ bioenergy sustainability certification: a global overview. *Energy Policy*; 39(3),1630-46
71. Sharma, B., Ingalls, R.G. Jones, C.L., Khanchi. A. Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24 (2013), pp. 608–627
72. Singha, R. K., Murty, H.R., Gupta, S.K. Dikshit, A.K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators* 15. 281–299 doi: 10.1016/j.ecolind.2011.01.007
73. Sinha, R., Laurenti, R., Singh, J., Malmström, M.E., Frostell, B., (2016). Identifying ways of closing the metal flow loop in the global mobilephone product system: a system dynamics modeling approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 113, 65–76.
74. Sterman, J.D., 2000. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. I.McGraw-Hill, ed., Unites States:
75. Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V.,(2016). A system dynamics model for platinum group metal supply, market price, depletion of extractable amounts, ore grade, recycling and stocks-in-use. *Resour. Conserv. Recycl.* 114, 130–152.
76. Tako, A. y Robinson, S. (2012) The Application of Discrete Event Simulation and System Dynamics in the Logistics and Supply Chain Context. *Decision Support Systems*, Vol. 52, No. 4, pp. 802-815.

77. Turner, B. L., Tidwell, V., Fernald, A., Rivera, J. A., Rodriguez, S., Guldan, S., ... & Cibils, A. (2016). Modeling acequia irrigation systems using system dynamics: Model development, evaluation, and sensitivity analyses to investigate effects of socio-economic and biophysical feedbacks. *Sustainability*, 8(10), 1019.
78. Turner, B. L., Wuellner, M., Nichols, T., Gates, R., Tedeschi, L. O., & Dunn, B. H. (2017). A systems approach to forecast agricultural land transformation and soil environmental risk from economic, policy, and cultural scenarios in the north central United States (2012–2062). *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(2), 102-123.
79. Turner, B. L., Wuellner, M., Nichols, T., Gates, R., Tedeschi, L. O., & Dunn, B. H. (2016). Development and evaluation of a system dynamics model for investigating agriculturally driven land transformation in the north central United States. *Natural Resource Modeling*, 29(2), 179-228.
80. Valencia, J. (2016). Síntesis metodológica para el estudio y representación de dinámicas complejas de mercados eléctricos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión Medellín, Colombia
81. Valencia, M., Cardona, C.A. (2014) The Colombian biofuel supply chains: The assessment of current and promising scenarios based on environmental goals. *Energy Policy* 67, 232-242
82. Van der Laaka, W.W.M., Raven, R.P.J.M., Verbon, G.P.J., (2007). Strategic niche management for biofuels: analysing past experiments for developing new biofuel policies. *Energy Policy* 35, 3213–3225
83. Verbraeck, A. y Van Houten, S. (2005) Simulation to Gaming: an Object Oriented Supply Chain Training Library. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*.(pp. 2346-2354).
84. Walter, A., Dolzan P., Quilodr'an O., Jana'ina G.de Oliveira, Da Silva, C., Piacente, F., Segerstedt A. (2011) Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy* 39,5703-5716
85. Walter, J., Archer D, Sassenrathc, F., Hendricksond, F., Hansond, J., Hallorane, J., Vadas, V., Alarcona, V. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling* Vol 333, 51–65
86. Walters, J. P., Archer, D. W., Sassenrath, G. F., Hendrickson, J. R., Hanson, J. D., Halloran, J. M., ... & Alarcon, V. J. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological modelling*, 333, 51-65.
87. WBCSD – World Business Council for Sustainable Development, (1997). *Signals of Change: Business Progress Toward sustainable Development*. Geneva, Switzerland.
88. Xin Meng, J.Y., Xin Xu, Lei Zhang, Qingjuan Nie, Mo Xian, Biodiesel Production From

- Oleaginous Microorganisms Renewable Energy, 2009. 34: P. 1-5.
89. Zabed H, Sahu JN, Boyce AN, Faruq G. (2016) Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renew Sust Energy Rev.*;66:751–74
 90. Zhang, Y., Zhao, T., Zhang, Z., Wan J., Feng X., Liang, X., Zhou, A. Modeling and dynamic assessment on sustainable development of drainage enterprise: Application of a coupled system dynamics comprehensive assessment model. *Journal of Cleaner Production* 141 (2017) 157-167.
 91. Ziemele, J., Gravelins, A., Blumberga, A., Vigants, G., & Blumberga, D. (2016). System dynamics model analysis of pathway to 4th generation district heating in Latvia. *Energy*, 110, 85-94.
 92. Liu, X., Mao, G., Ren, J., Li, R. Y. M., Guo, J., & Zhang, L. (2015). How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO₂ emissions using the system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 103, 401-410.
 93. Walters, J. P., & Javernick-Will, A. N. (2015). Long-term functionality of rural water services in developing countries: a system dynamics approach to understanding the dynamic interaction of factors. *Environmental science & technology*, 49(8), 5035-5043.
 94. Sun, Y., Liu, N., Shang, J., & Zhang, J. (2017). Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of cleaner production*, 142, 613-625.
 95. Duran-Encalada, J. A., Paucar-Caceres, A., Bandala, E. R., & Wright, G. H. (2017). The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 567-581.
 96. Rehan, R., Unger, A., Knight, M. A., & Haas, C. (2015). Strategic Water Utility Management and Financial Planning Using a New System Dynamics Tool. *Journal: American Water Works Association*, 107(1).
 97. Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 573, 444-457.
 98. Kotir, J. H., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2017). Systemic feedback modelling for sustainable water resources management and agricultural development: An application of participatory modelling approach in the Volta River Basin. *Environmental Modelling & Software*, 88, 106-118.
 99. Qiang, F., Tianxiao, L., Dong, L., & He, D. (2016). Simulation study of the sustainable utilization of urban water resources based on system dynamics: a case study of Jiamusi. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(4), 980-991.

100. Sahin, O., Siems, R., Richards, R. G., Helfer, F., & Stewart, R. A. (2017). Examining the potential for energy-positive bulk-water infrastructure to provide long-term urban water security: A systems approach. *Journal of Cleaner Production*, 143, 557-566.
101. Inman, D., Warner, E., Stright, D., Macknick, J., & Peck, C. (2016). Estimating biofuel feedstock water footprints using system dynamics. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(4), 343-355.
102. Zhou, J., & Liu, Y. (2015). The method and index of sustainability assessment of infrastructure projects based on system dynamics in China. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(3), 1002.
103. Marzouk, M., & Azab, S. (2017). Analyzing sustainability in low-income housing projects using system dynamics. *Energy and Buildings*, 134, 143-153.
104. Ozcan-Deniz, G., & Zhu, Y. (2016). A system dynamics model for construction method selection with sustainability considerations. *Journal of Cleaner Production*, 121, 33-44.
105. de Gooyert, V., Rouwette, E., van Kranenburg, H., Freeman, E., & van Breen, H. (2016). Sustainability transition dynamics: Towards overcoming policy resistance. *Technological Forecasting and Social Change*, 111, 135-145.
106. Sudarto, S., Takahashi, K., & Morikawa, K. (2017). Efficient flexible long-term capacity planning for optimal sustainability dimensions performance of reverse logistics social responsibility: A system dynamics approach. *International Journal of Production Economics*, 184, 179-192.
107. Shamsuddoha, M. (2015). Integrated Supply Chain Model for Sustainable Manufacturing: A System Dynamics Approach. In *Sustaining Competitive Advantage Via Business Intelligence, Knowledge Management, and System Dynamics* (pp. 155-399). Emerald Group Publishing Limited.
108. Abdelkafi, N., & Täuscher, K. (2016). Business models for sustainability from a system dynamics perspective. *Organization & Environment*, 29(1), 74-96.
109. Mustajib, M. I., & Ilhamsah, H. A. (2016). Towards Sustainable Creative Industries through System Dynamics Perspective: A Conceptual Model in Indonesia Context. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(22), 10867-10869.
110. Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., & Egilmez, G. (2016). Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 1009-1034.

111. Tan, B. S., & Yap, E. H. (2015). Sustainable Growth of the Commercial Aviation Industry in Malaysia Using a System Dynamics Approach. *Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(9).
112. Haghshenas, H., Vaziri, M., & Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45, 104-115.
113. Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25-35.
114. Li, C. F., Cao, Y. Y., Yang, J. C., & Yang, Q. Q. (2015). Scenario analysis on sustainable development of Sino-Singapore Tianjin Eco-city based on energy and system dynamics. *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology*, 26(8), 2455-2465.
115. Allington, G. R., Li, W., & Brown, D. G. (2017). Urbanization and environmental policy effects on the future availability of grazing resources on the Mongolian Plateau: Modeling socio-environmental system dynamics. *Environmental Science & Policy*, 68, 35-46.
116. Wan, L., Zhang, Y., Qi, S., Li, H., Chen, X., & Zang, S. (2017). A study of regional sustainable development based on GIS/RS and SD model—Case of Hadaqi industrial corridor. *Journal of Cleaner Production*, 142, 654-662.
117. Sterman, J., Rooney-varga, J. N., Jones, A., Johnston, E., Rath, K., & Nease, J. (2014). Let the Games Begin: New Opportunities to Address Climate Change Communication, Education, and Decision Support. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
118. Sterman J.D. (2012) Sustaining Sustainability: Creating a Systems Science in a Fragmented Academy and Polarized World. In: Weinstein M., Turner R. (eds) Sustainability Science. Springer, New York, NY

ANEXOS

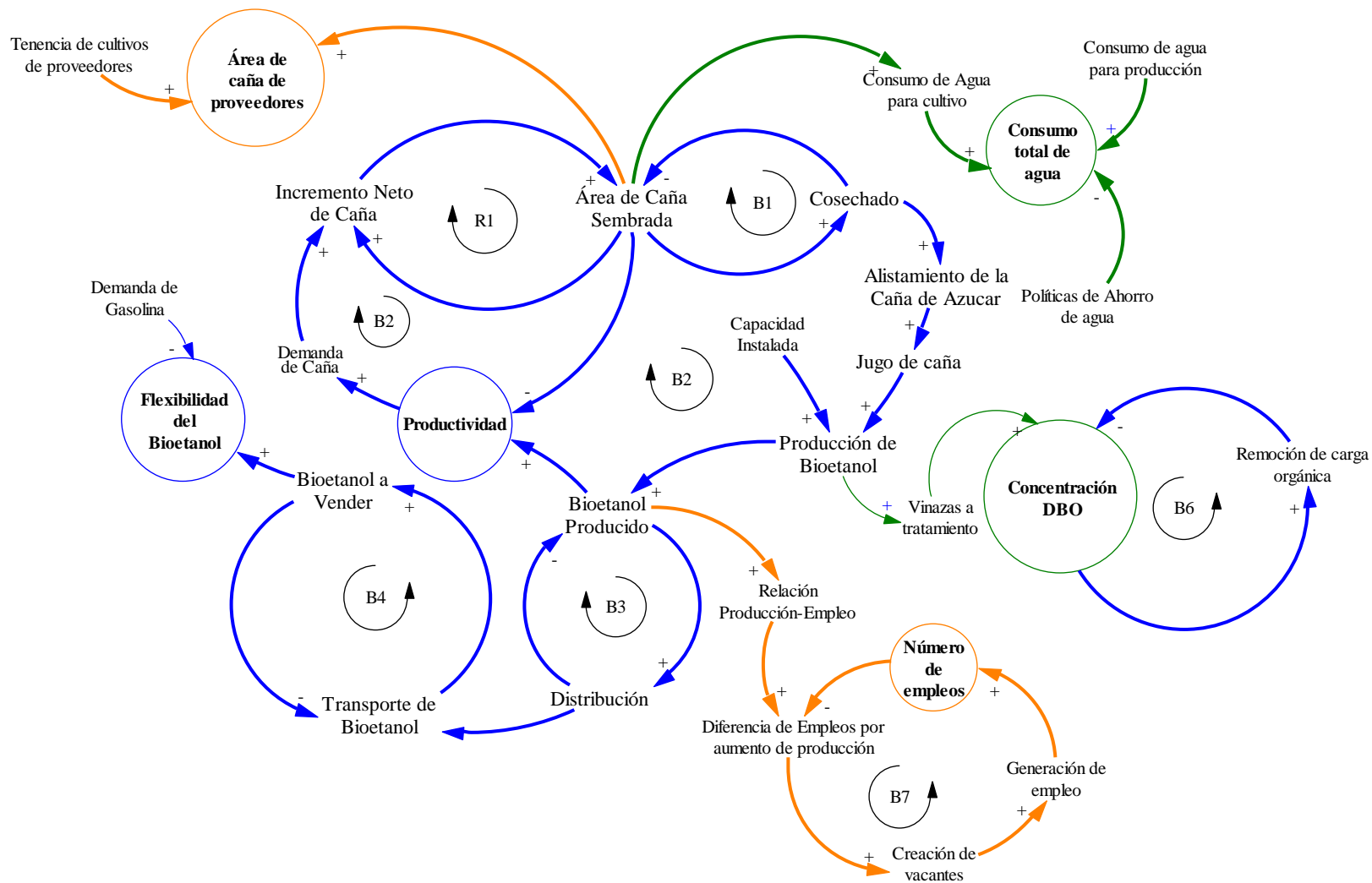


Figura 52. Diagrama causal con indicadores de sostenibilidad.

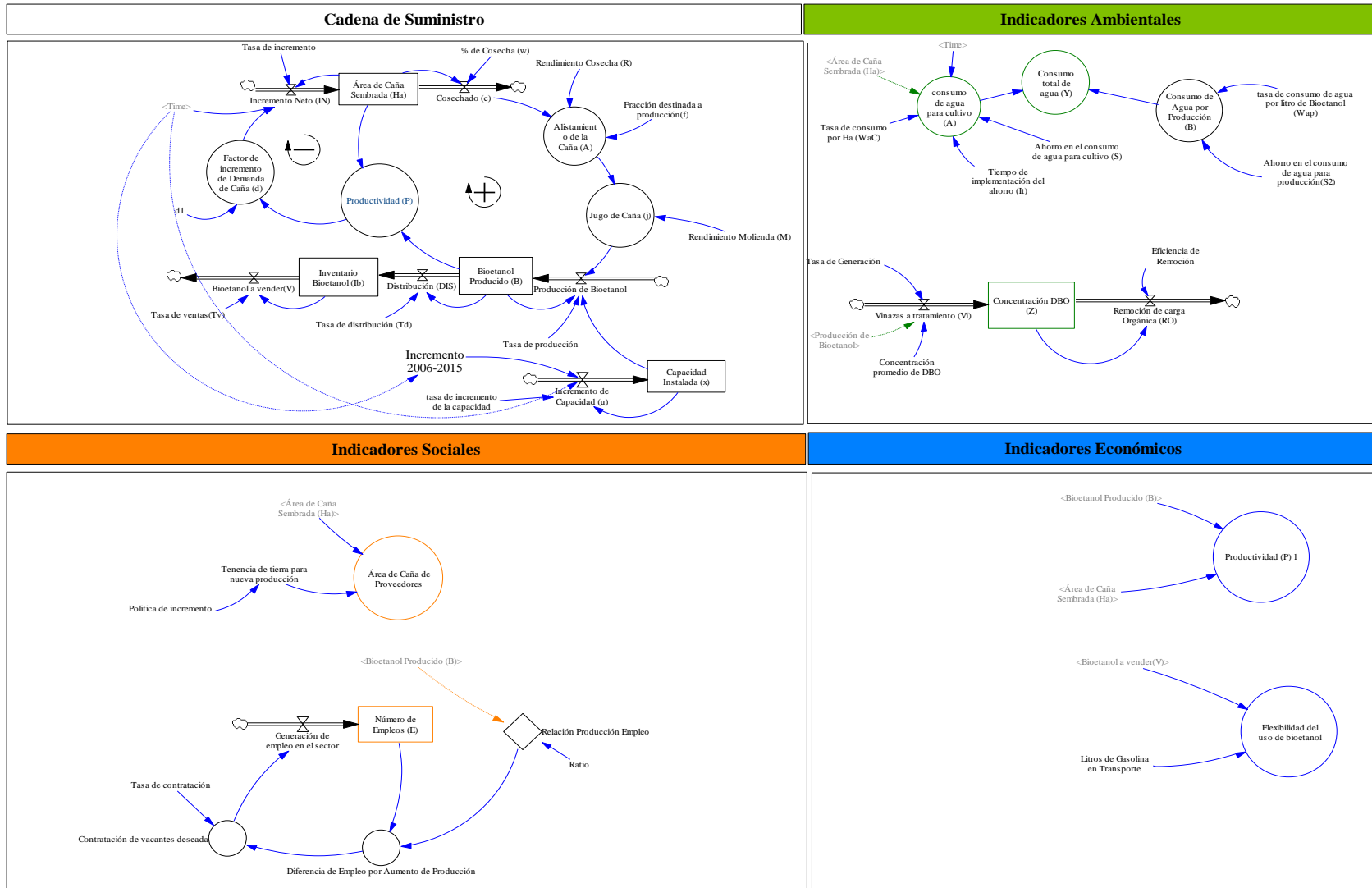


Figura 53. Diagrama de Niveles y Flujos con módulos de sostenibilidad.

Tabla 14. Ecuaciones.

Nombre de la Variable	Símbolo	Tipo	Ecuación	Unidades
Área de Caña Sembrada	Ha	Nivel	$\frac{dHa}{dt} = IN - C$	Hectáreas
Bioetanol producido	B	Nivel	$\frac{dB}{dt} = Producción\ de\ B - DIS$	Litros Bioetanol
Inventario de Bioetanol	IB	Nivel	$\frac{dIB}{dt} = DIS - V$	Litros Bioetanol
Capacidad Instalada	X	Nivel	$\frac{dx}{dt} = s$	Litros Bioetanol
Incremento Neto	IN	Flujo	$IN = \begin{cases} Ha + (Ha.k) & Si\ t < ti \\ Ha + (Ha.k1).d & Si\ t \geq ti \end{cases}$	Hectáreas/año
Cosechado	C	Flujo	$C = Ha.w$	Hectáreas/año
Producción de Bioetanol	$Prod. B$	Flujo	$Prod. B = \begin{cases} x & si\ B \geq x \\ j.k & Si\ B < x \end{cases}$	Litros Bioetanol/año
Distribución	DIS	Flujo	$DIS = B.Td$	Litros Bioetanol/año
Bioetanol a vender	V	Flujo	$V = IB.Tv$	Litros Bioetanol/año
Incremento de capacidad	s	Flujo	$s = \begin{cases} Tabla & if\ t < ti \\ (x.u) & if\ t \geq ti \end{cases}$	Litros Bioetanol/año
Productividad	P	Auxiliar	$P = \frac{B}{Ha}$	Litros/Hectárea
Alistamiento	A	Auxiliar	$A = (R.C).f$	Toneladas de Caña
Jugo de Caña	j	Auxiliar	$j = A.M$	Litros Jugo
Factor de demanda	d	Auxiliar	$d = \begin{cases} f1 & si\ P \geq n \\ f2 & si\ P < n \end{cases}$	Adimensional
DBO	z	Nivel	$\frac{dz}{dt} = Vi - RO.$	Kg DBO
Empleos	E	Nivel	$\frac{dE}{dt} = Ge$	Empleos

Consumo de Agua en Cultivo	A	Auxiliar	$A = \begin{cases} (WaC.Ha) * S, & \text{si } time \geq It \\ WaC.Ha, & \text{si } time < It \end{cases}$	m ³ /año
Consumo de Agua en producción	B	Auxiliar	$B = Prod. B.Wap.S2$	m ³ /año
Área de caña de proveedores	ϑ	Auxiliar	$\vartheta = Ha.(t/100)$	Porcentaje
Flexibilidad	Flex	Auxiliar	$Flex = (V/Gasolina) * 100$	Porcentaje

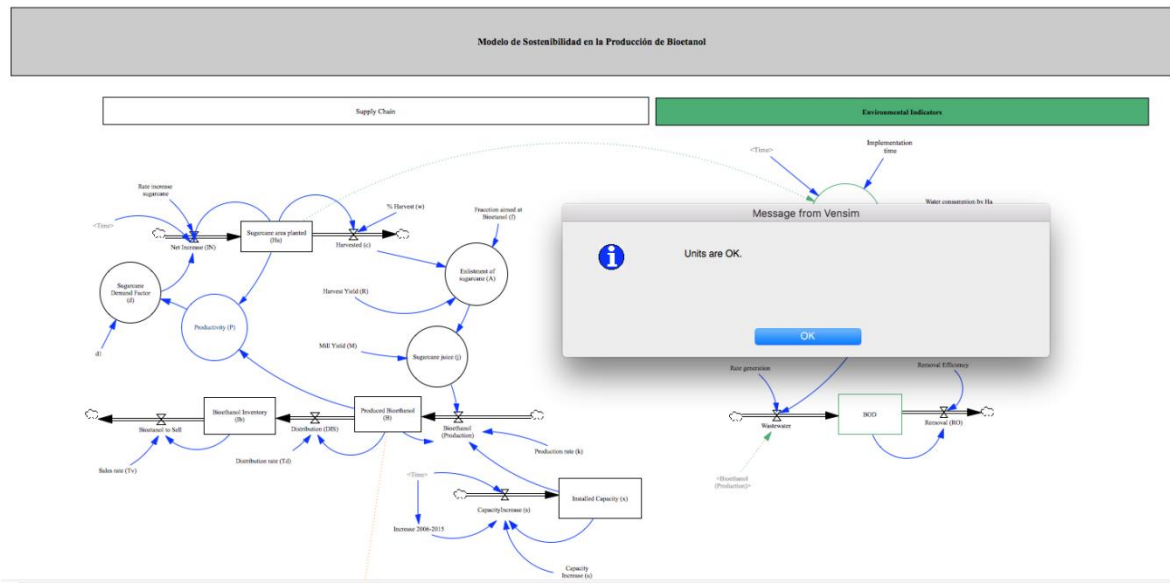


Figura 54. Chequeo de unidades desde el Software Vensim Ple.

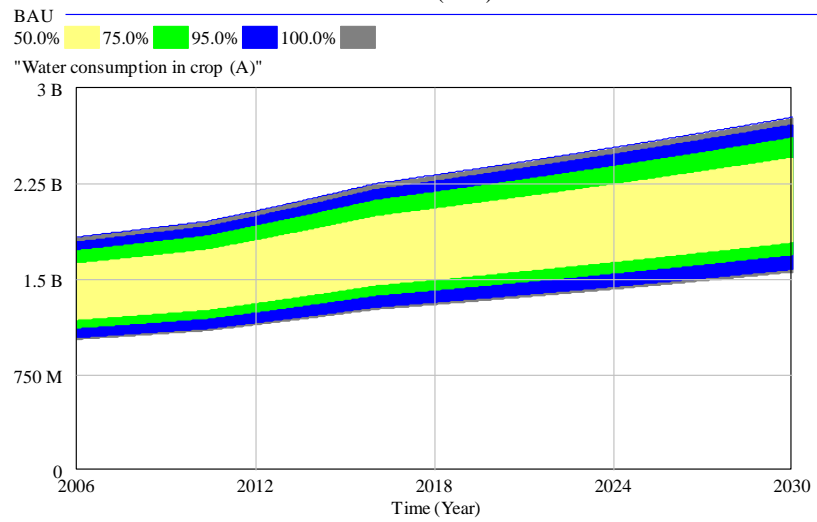
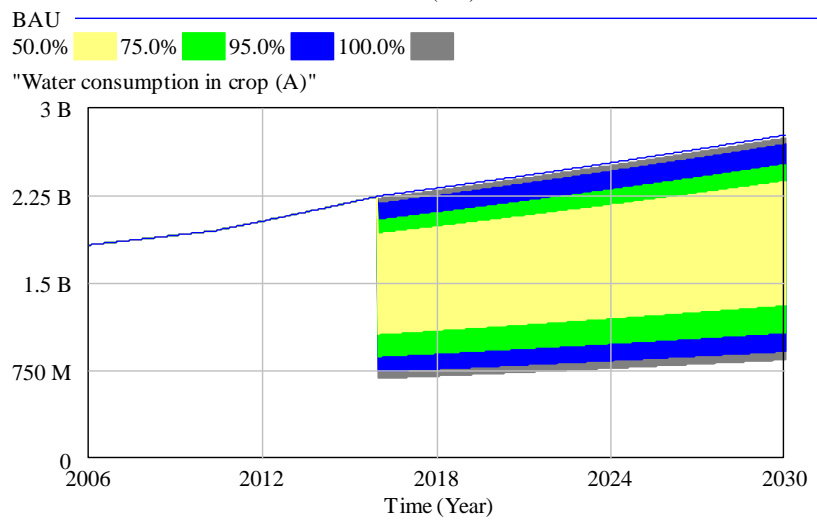
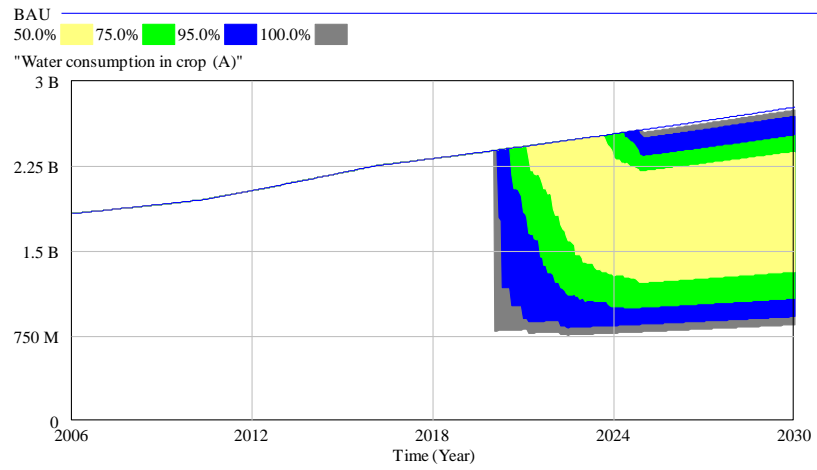


Figura 55. Análisis de Sensibilidad en el consumo de agua.

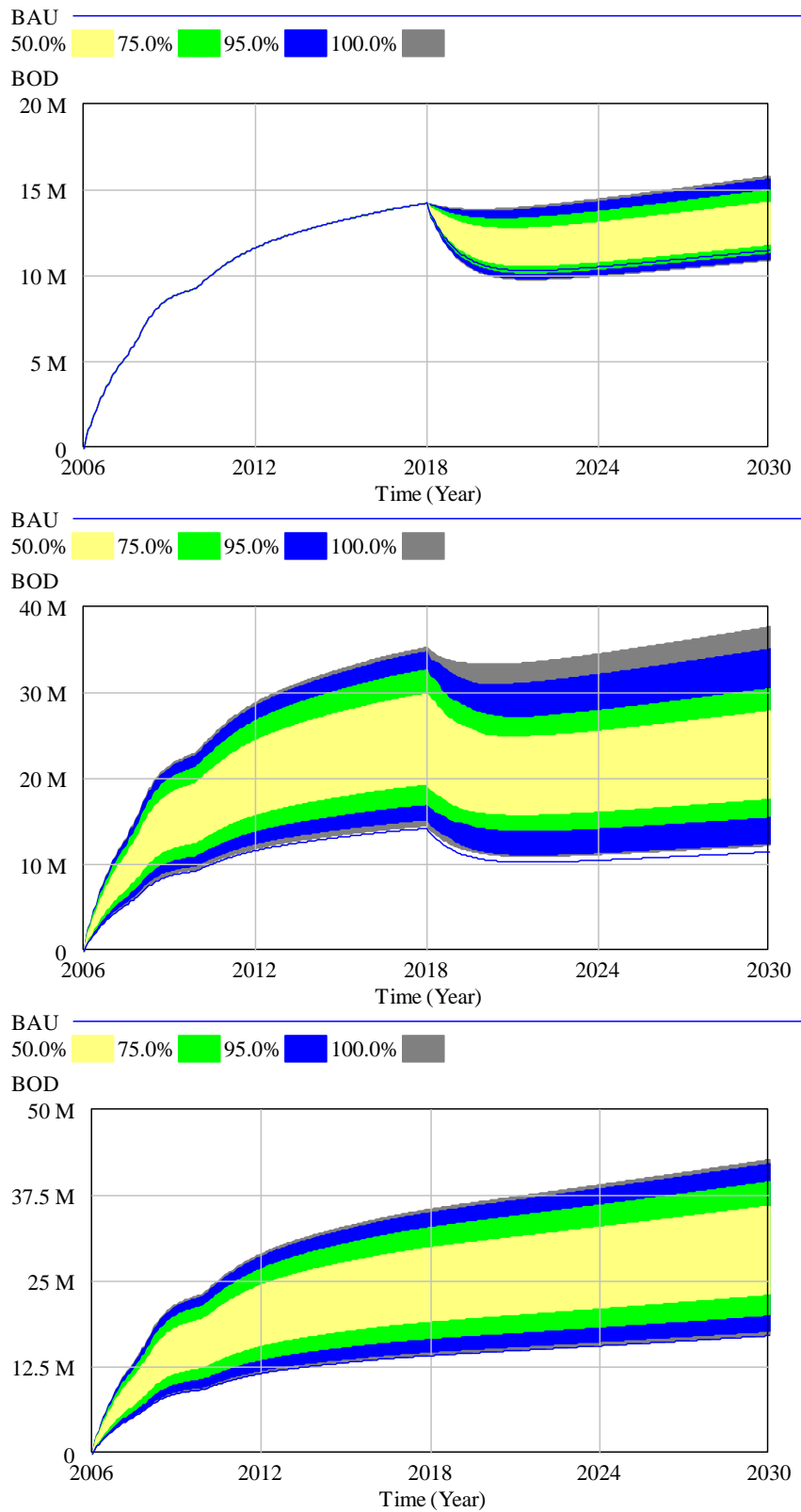


Figura 56. Análisis de Sensibilidad en Eficiencia de remoción de DBO y generación de vinazas.

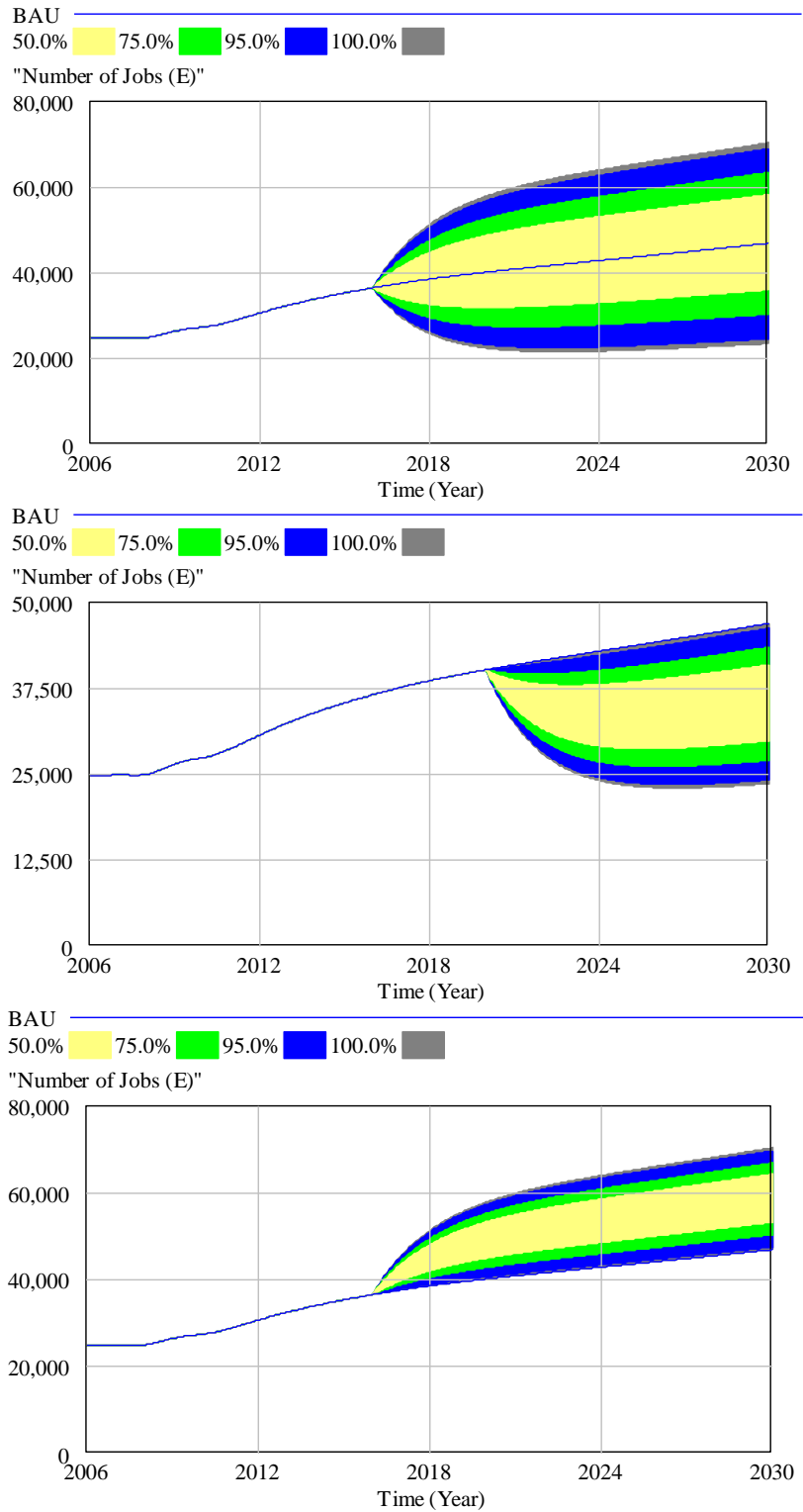
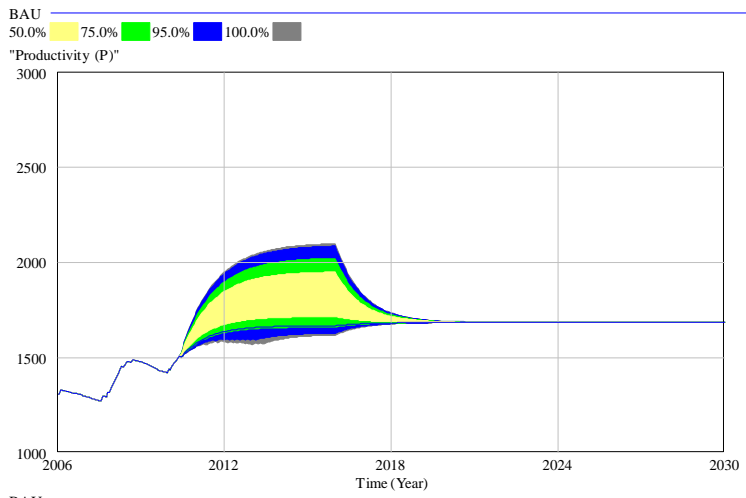
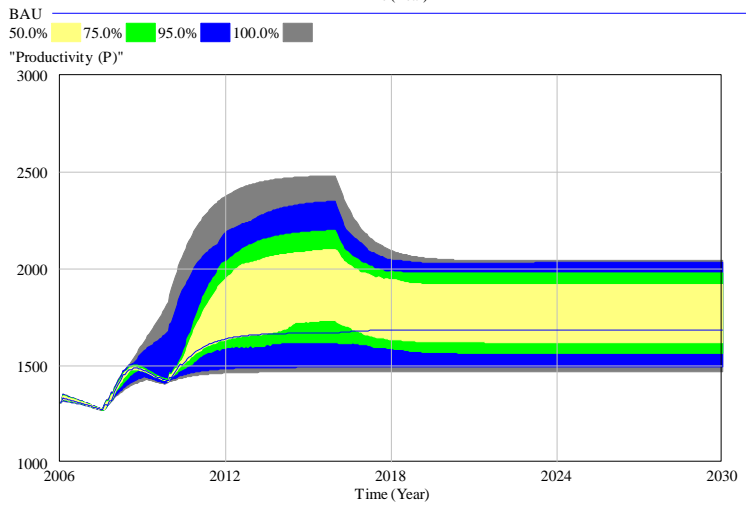


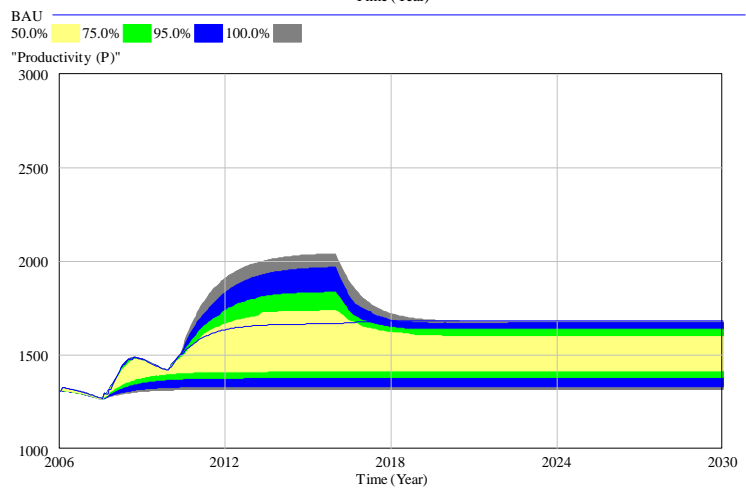
Figura 57. Análisis de Sensibilidad en cambios en el ratio empleos-producción.



a)



b)



c)

Figura 58. Análisis de Sensibilidad cambios en la demanda (a) y aumento y disminución de capacidad de producción (b) y (c).