

MODELACIÓN DE ASPECTOS AMBIENTALES EN LA CADENA DE SUMINISTRO DEL BIOETANOL^{*}

MODELING ENVIRONMENTAL ISSUES IN THE SUPPLY CHAIN OF BIOETHANOL

Danny W. Ibarra ^{1,*}, Johan Manuel Redondo¹, Carlos Fajardo²

RESUMEN

En este artículo se ha construido un modelo en el que se incluye algunos aspectos ambientales, asociados a la cadena de suministro de bioetanol en Colombia, tales como vinazas, bagazo de caña y emisiones de CO₂, teniendo en cuenta que una de las orientaciones más importantes en la actualidad para que una empresa sea competitiva, es la gerencia de la cadena de suministro verde o sostenible. Dicha cadena es de naturaleza dinámica, por las relaciones complejas entre las partes asociadas y el flujo constante de información, bienes y materiales. Por esto se utilizó la metodología de análisis basada en la dinámica de sistemas, la cual resulta de mucha utilidad para abordar problemas complejos y sistémicos, en que se asocian variables externas como las ambientales, logrando entender mejor y haciendo la toma de decisiones más acertada. Este trabajo muestra a través de las simulaciones que es necesario vincular estrategias de gestión ambiental en la cadena de suministro de bioetanol, para mitigar el impacto ambiental causado por sus residuos.

Palabras Claves: Dinámica de Sistemas, cadenas de suministro, medio ambiente, bioetanol

ABSTRACT

In this paper has been constructed a model that includes some environmental issues, associated with the supply chain of bioetanol in Colombia, such as stillage, bagasse and CO₂ emissions. Considering that one of the most important issues today for company to be competitive, is the management of the supply chain, withth is one of the fundamental pillars to ensure the promise of value offered to customers.

The chainis dynamic in nature, by the complex relation ships between the partner sand the constant flow of information, good sand materials.

Therefore, it used the analysis methodology based on system dynamics, that is very useful in addressing complex and systemic problems in the associated external and environmental

^{*} Trabajo presentado en el VI Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias, 24 al 26 de julio de 2013. Pontificia Universidad Javeriana de la ciudad de Bogotá D.C. – Colombia. Artículo actualizado

¹Escuela de Ciencias Exactas en Ingeniería, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia.

²Universidad El Bosque. Bogotá, Colombia

*Autor para correspondencia: ingdanny09@hotmail.com.

Recibido: 21.08.2013 Aceptado: 10.11.2013

variables, achieving better understanding and making decisions more accurate. This paper shows, through simulations, that it is necessary to link environmental management strategies in the bioethanol supply chain to mitigate the environmental impact caused by his waste.

Keywords: System dynamics, supply chain, environment, bioethanol

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, preservar y heredar un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad, creando una visión de desarrollo sostenible en la industria y la empresa, impulsado por un cambio de tecnologías y procesos para mitigar el impacto ambiental causado por las industrias, lo cual permite llegar a una producción más limpia, pasando desde el cambio de materias primas hasta la optimización de cadenas de suministro. La cadena de suministro es uno de los aspectos más importantes para que una empresa sea competitiva dicha cadena de suministro es de naturaleza dinámica, por las relaciones complejas entre las partes asociadas y el flujo constante de información, bienes y materiales. De acuerdo con la definición del Consejo de gestión de logística (*Council of Logistics Management-CLM*), la gestión de la cadena de suministro comprende la planeación y gestión de todas las actividades de adquisiciones y compras, conversión, y de gestión de logística. Incluye también la coordinación y colaboración entre niveles o etapas, los cuales pueden ser proveedores, intermediarios, proveedores de logística y clientes. Esto incluye extracción de materias primas, producción y otros eslabones que implican algún grado de afectación sobre aspectos ambientales circundantes, que muchas veces nunca son tenidos en cuenta. Es por esto que se hace importante la vinculación de los aspectos ambientales en las cadenas de suministro, como respuesta al cambio de paradigma que llevaría a empresas a ser más competitivas.

Actualmente es necesario tener en cuenta el impacto ambiental que tiene un producto cualquiera, y para ello se hace necesario un enfoque en el análisis de las redes que permita una medición de la sostenibilidad e impacto de los procesos sobre los que se soporta el producto (Heiskanen & Jalas, 2000; Komoto, *et al* 2005; Zhai, Khoo, & Zhong 2009). Debido a esto ha surgido un nuevo concepto o filosofía organizacional, que se entiende como "Green Supplychain.

La Gestión de Cadena de Suministro Verde o Green SupplyChain Management (GSCM) puede ser definida como la inclusión de un pensamiento ambiental, que cubre desde la integración del diseño del producto, selección y aprovisionamiento de materias primas, producción, distribución y entrega del producto final a los consumidores, hasta el final del ciclo de vida de los productos y la logística inversa (Srivastava, 2007).

La GSCM se ha convertido en una necesidad, ya que las preocupaciones ambientales se han mantenido a la vanguardia del debate de los intereses sociales globales y locales (Sarkis, 2003). Esta sería entonces una estrategia de valor a vincular en las cadenas de suministro. De acuerdo con Porter (1995), una estrategia radica en la creación de una posición única y de valor, que involucra la gestión de un conjunto de actividades significativas. Esta estrategia permitiría a las empresas utilizar una amplia gama de nuevos mercados y así generar más beneficios, que irían desde las materias primas a la compensación de energía usada en el trabajo. De manera que reduzcan los costos de mitigar el impacto ambiental, para llegar a ser verde y competitivo (Porter & Van der Linde, 1995).

De acuerdo con lo anterior, se plantea una hipótesis en la que mediante herramientas de modelado y simulación como la Dinámica de Sistemas es posible asociar variables externas

como las ambientales en la cadena de suministro del bioetanol, de manera que se pueda obtener un modelo matemático, realizar simulaciones y visualizar posibles escenarios.

En este trabajo se muestra la aplicación de metodología de dinámica de sistemas para modelar y entender la cadena de suministro para bioetanol, vinculándole aspectos ambientales tanto del proceso como del impacto del producto generado. Este artículo es una primera aproximación para lograr la modelación de cadenas de suministro verdes, dentro del campo de los biocombustibles.

METODOLOGÍA: DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas es una metodología para el análisis y resolución de problemas, desarrollada por el ingeniero Jay Forrester del Massachusetts Institute of Technology (MIT) presentada en sus obras (Forrester, 1969; Forrester, 1999). Esta fue concebida inicialmente para abordar un problema específico que presentaba una empresa de suministro de productos electrónicos, que teniendo pocos clientes con pedidos estables y previsible, manifestaba oscilaciones en su línea de producción. Del análisis de este problema se concluyó que estas oscilaciones se debían a las emergencias de estructuras de realimentación y a la presencia de retrasos en la transmisión de la información, naciendo de esta manera las bases de la metodología que hoy se conoce como dinámica de sistemas. Esta facilita el acercamiento al aprendizaje de sistemas complejos a través de modelos formales y métodos de simulación (Ramírez, 2010).

En dinámica de sistemas se concibe cualquier aspecto del mundo como la interacción causal entre atributos que lo describen. De esta forma se construyen representaciones sistémicas con flechas y puntos, denominadas Diagramas Causales, que capturan todas las hipótesis propuestas por el modelador, desde las que se puede aprender del sistema para intervenir sobre él en el ejercicio de decisión. Posteriormente se obtiene el Diagrama de Niveles y Flujos, donde se realiza una cuantificación del diagrama causal, para, de este modo, obtener un conjunto de ecuaciones que permitan ver al tomador de decisión el comportamiento del sistema de interés a través de simulaciones en software especializado.

Dinámica de Sistemas y Cadenas de Suministro

Una de las mayores necesidades que tiene la organización es el desarrollo de sistemas de información que posean sistemas de soporte de decisiones que permitan una disminución de los niveles de incertidumbre y, por tanto, que las alternativas que se tomen tengan umbrales de riesgo más bajos (Aslan *et al.*, 2012; Gaines, 1990; Nunes *et al.*, 2009; Su & Yang, 2010).

Debido a la naturaleza dinámica de las cadenas de suministro, la modelación se percibe como un instrumento natural e importante para el análisis y diseño de cadenas de suministro y gestión de la cadena de suministro y que, además, provee soluciones para un gran espectro de variables asociados a logística y abastecimiento en sus aspectos estratégico, operacional y táctico (Tako & Robinson, 2012; Verbraeck & Van Houten, 2005).

Entre los autores que han incluido la dinámica de sistemas en el modelamiento de cadenas de suministro, se resalta a Forrester (1999), quien describe un modelo de cadena de suministro teórica creado con su técnica, lo que hoy se conoce como dinámica de sistemas. Towill (1995) citado por Vlachos *et al.*, (2007) aplica la dinámica de sistemas para el rediseño de la cadena de suministro. Minegishi & Thiel (2000) aplican la dinámica de sistemas para mejorar la comprensión del comportamiento complejo de la logística integrada.

Las simulaciones ayudan a la comprensión de la cadena de suministro, en el sentido que permiten ver las variaciones de su comportamiento bajo la variación de parámetros y de condiciones iniciales. Esto permite estructurar, transformar, condensar y mostrar visualmente datos con los que los administradores pueden comprender rápidamente una situación y actuar sobre la información presentada.

Una cadena de suministro es la “empresa extendida”, que abarca los vendedores, fabricantes / productores, distribuidores y minoristas. Se caracteriza por una estructura del stock y de los flujos para la adquisición, almacenamiento y transformación de insumos en productos y reglas de decisión que rigen estos flujos (Forrester, 1999; Sterman, 2000). Los flujos suelen crear reacciones importantes entre los socios de la cadena extendida, lo que hace a la Dinámica de Sistemas una técnica de modelado muy adecuada y una herramienta de análisis estratégico para la administración de la cadena de suministro (Georgiadis *et al.*, 2005).

Por otra parte, se han realizado trabajos donde se analiza la cadena de abastecimiento de procesos de comercio electrónico mostrando el impacto que tiene el uso del valor presente neto en la valoración de la dinámica del desempeño de la cadena (Naim, 2006).

De igual importancia están trabajos como los de Özbayrak *et al.* (2007), los cuales utilizan la dinámica de sistemas para análisis de sistema “Make-To-Order”, así como Georgiadis & Besiou (2008), los que examinan el impacto de la motivación ecológica y la innovación tecnológica en el comportamiento a largo plazo de cadenas de abastecimiento con actividades de reciclaje.

Dado lo anterior, se puede afirmar que hay dos enfoques en el manejo de los problemas de cadenas de abastecimiento: (i) Uno, que se centra en el análisis del impacto de algunos factores o en el efecto de algunas estrategias en el rendimiento del sistema (Campuzano, *et al.*, 2010; Springer & Kim, 2010), y (ii), y otro que se centra en las decisiones para implementar estrategias de mejora de la cadena de suministros (Saeed, 2008).

El análisis realizado en este trabajo se enmarca en el primer enfoque, tal y como quedará demostrado a continuación, en donde se realizó el proceso de modelación, centrado en los factores como producción, transporte y consumo.

Aspectos ambientales: sector bioetanol de caña de azúcar

El uso de biocombustibles actualmente tiene amplio reconocimiento mundial como posible solución potencial al problema de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos se han ido posicionando cada vez más, como una energía alternativa a los combustibles fósiles usados de manera tradicional. Entre los biocombustibles de primera generación se encuentran el bioalcohol y el biodiesel.

El bioetanol o alcohol carburante es obtenido de la fermentación alcohólica del jugo clarificado de la caña de azúcar, el cual tiene una demanda creciente en el mercado colombiano. En el año 2011 se produjeron 337 millones de litros de alcohol carburante, 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 desde noviembre de 2005. En la actualidad, esta gasolina oxigenada da cobertura a prácticamente todo el territorio nacional, según información de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia ASOCAÑA (2012). Si bien es cierto que, aunque algunos impactos positivos son de carácter general, como la reducción de emisiones de algunos contaminantes del aire a escala local, la naturaleza y magnitud de los impactos ambientales derivados de la producción y consumo de los biocombustibles depende de diversos factores como: Capacidad de molienda de caña, tratamiento de residuos, tratamiento de aguas por mencionar algunos. (Gómez *et al.*, 2008). De acuerdo con esto, los

impactos ambientales se pueden asociar a las siguientes etapas:

- Producción agrícola.
- Transporte y distribución hacia la industria.
- Transformación industrial.
- Transporte y distribución hacia el consumo.

Modelado

A continuación se muestra una cadena de suministro del bioetanol, propuesta para el modelado. Se encuentra simplificada en tres etapas (Figura 1). Obtención de materia prima, fabricante y mayorista, relacionada con algunos aspectos ambientales implícitos a esta industria.

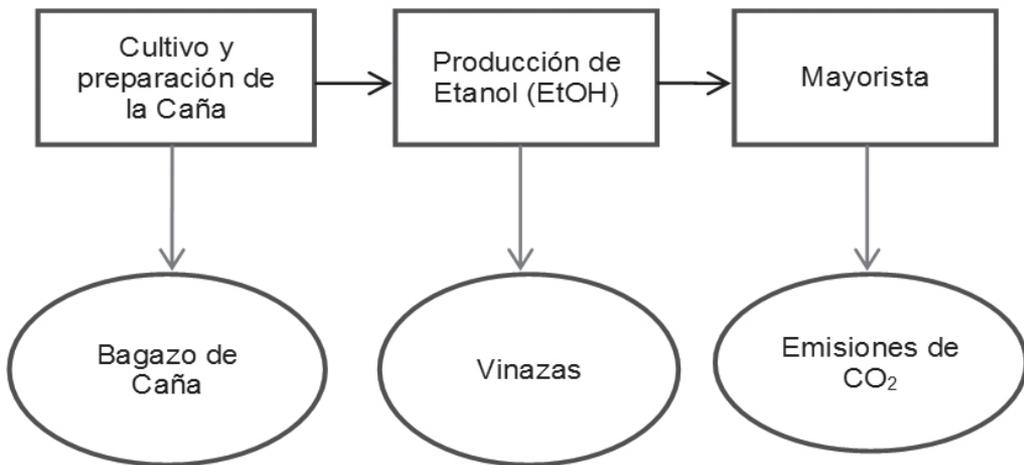


Figura 1. Aspectos Ambientales en la cadena de Suministro de bioetanol(EtOH).

Hipótesis Dinámica

Como paso previo a la construcción del modelo, se define que: el bagazo de caña y las vinazas son residuos generados durante el proceso productivo del bioetanol de caña. Estos se asocian directamente al proceso de molienda para la obtención de jugo y la fermentación alcohólica que se lleva en la fábrica.

En el modelado de la cadena de suministro de bioetanol se han considerado las siguientes hipótesis:

H1: La obtención de jugo fermentable para la elaboración del bioetanol depende de la cantidad de hectáreas (ha) de caña sembradas y la capacidad de molienda para su obtención. De este modo, si aumentan las ha de caña, entonces aumentará la cantidad de caña cosechada, después de un retardo. Despreciando la variabilidad climática y las prácticas agrícolas en el cultivo.

H2: La caña cosechada llega al proceso de molienda. Mediante presión mecánica se extrae el jugo que contiene la sacarosa, y se envía al proceso de elaboración de Bioetanol. En esta molienda se genera bagazo de caña a diario.

H3: Un incremento en la producción de Bioetanol (EtOH) conduce al aumento del inventario de EtOH en la fábrica, teniendo en cuenta que la producción depende de la disposición del jugo fermentable. En esta cadena en particular, el proceso de intercambio de producto es inmediato, por lo que se asume que lo que se produce pasa directamente al inventario de la fábrica.

H4: La destilación del etanol obtenido deja la vinaza como resultante de esta operación. La vinaza es un residuo o subproducto que representa entre 10 a 13 litros de vinaza por litro de etanol hidratado.

Las anteriores hipótesis son representadas como relaciones causales, conformando un diagrama causal (Figura 2).

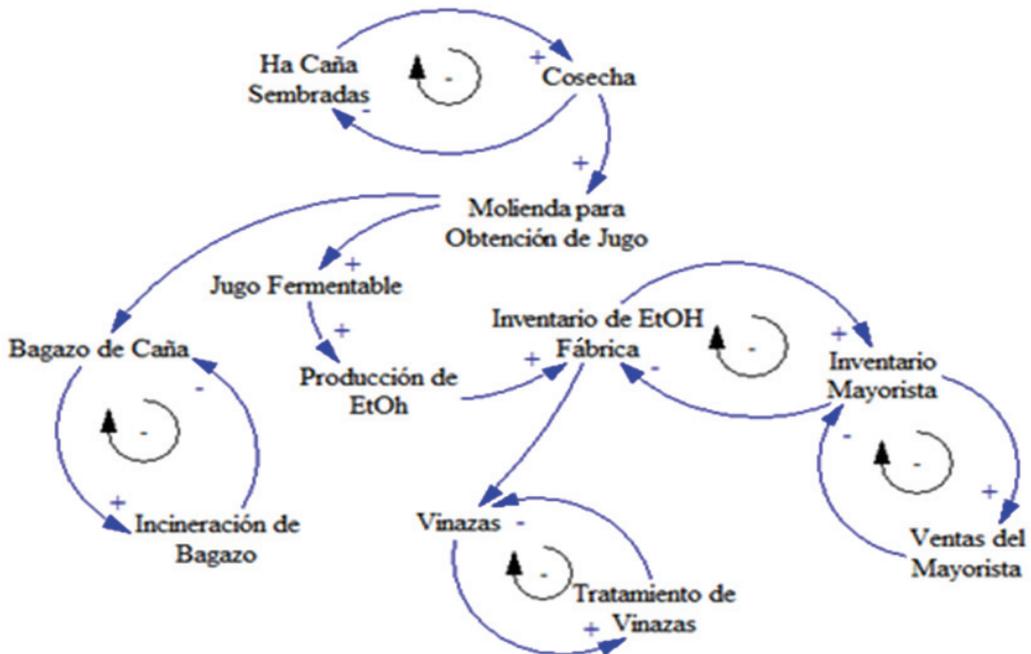


Figura 2. Diagrama Causal del Problema estudiado

Definición formal del modelo

A partir del diagrama causal obtenido, se construyó el diagrama de niveles y flujos en el que se vincularon algunos eslabones de la cadena para la formulación del modelo teórico de cadenas de suministro y aspectos ambientales, usando dinámica de sistemas. Para éste se tuvo en cuenta como variables de estado (niveles) las hectáreas cultivadas de caña de azúcar, el inventario de bioetanol (EtOH) producido a partir de la fermentación de jugos de la caña de azúcar (la fábrica), el inventario de bioetanol entregado al mayorista. Asimismo, otras variables que hacen parte del proceso de modelado, que se definen a continuación:

VARIABLES DE NIVEL:

Hectáreas (Ha) de Caña Sembrada: Esta variable la incrementa el proceso de siembra y la desacumula la cosecha de caña para fabricación de bioetanol.

Inventario de Bioetanol (EtOH) Fábrica: Esta variable acumula los litros de EtOH producidos diario, y la desacumula las entregas al mayorista.

Inventario de Bioetanol (EtOH) Mayorista: Esta variable la acumula los litros de EtOH provenientes de la fábrica y la desacumula los litros entregados al minorista.

Bagazo de Caña: Esta variable acumula la cantidad de bagazo generado que proviene del proceso de molienda.

Vinazas: Esta variable acumula la cantidad de vinazas generadas en el proceso de producción.

Toneladas (Ton) de CO₂: Esta variable representa la cantidad de CO₂ emitido en fábrica y transporte hacia el mayorista.

Variables de flujo

Siembra de caña: Cantidad de caña a sembrar con relación a un tiempo de alistamiento agrícola.

Cosecha: Cantidad de hectáreas de caña cosechadas destinadas a la producción EtOH.

Producción de EtOH: Cantidad de litros de bioetanol en proceso de producción con relación al tiempo de producción y cantidad de jugo fermentable.

Entregas al mayorista: Es la cantidad de bioetanol que proviene de la fábrica y va hacia el inventario del mayorista.

Ventas del mayorista: Representa la desacumulación del inventario del mayorista.

Generación de Bagazo: Es la cantidad de bagazo que se está generando por la molienda y la tasa de generación.

Incineración de Bagazo: Es la cantidad de bagazo incinerada para la generación de energía, depende si se implementa la estrategia.

Generación de Vinazas: Cantidad en litros de vinazas que se están generando en el proceso de producción.

Tratamiento de vinazas: Cantidad de litros de vinazas con tratamiento antes de su disposición final.

Emisiones de CO₂: Cantidad de emisiones generadas en fábrica y transporte de producto.

Variables Auxiliares:

Molienda para la obtención de jugo: Es el proceso de molienda de la caña para la obtención del jugo fermentable para la producción de EtOH.

Jugo Fermentable: Cantidad de jugo obtenido en la molienda. Varía con el rendimiento en molienda.

Fracción de Bagazo a incinerar: Es la cantidad de bagazo que se dispone a incinerar para la generación de energía.

Estrategias Ambientales

Reúso de Bagazo para Energía: Es la estrategia del ingenio para disminuir el bagazo generado en el proceso productivo, por medio de la incineración para el aprovechamiento energético.

Gestión de vinazas: Es la estrategia del ingenio para la disposición adecuada de las vinazas generadas, que podrían tener un grave impacto sobre los cuerpos de agua donde se viertan.

Estas dos últimas variables auxiliares representan la decisión de implementar esa estrategia o no hacerlo. Todas las variables anteriormente definidas se muestran en el diagrama de niveles y flujos (Figura 3).

De los aspectos ambientales se tuvo en cuenta, como variables de estado, al menos uno que estuviera asociado a cada uno de los eslabones de la cadena. De este modo, se tomó el bagazo de caña, y se asoció al cultivo y preparación de la caña. Este bagazo se genera por la molienda para la obtención del jugo fermentable. (el bagazo sin tratamiento posterior, puede representar una acumulación excesiva de residuos por su elevada tasa de generación). Las vinazas, que son el agua residual de la producción de alcohol, se encuentran entre los residuos orgánicos de mayor efecto contaminante sobre la flora y la fauna del planeta. Estas se asocian a la cantidad de bioetanol producido; el problema es que sin tratamiento, por cada litro de alcohol producido se podrían generar entre 7 y 14 litros de vinaza, con una demanda química de oxígeno (DQO) entre 60 y 70 g/l y un PH cercano a 4 (Lizcano & Mora, 2005). Y, por último, las emisiones de CO₂; para este modelo solo se asociaron al transporte del bioetanol, desde la fábrica hasta el mayorista, suponiendo un consumo motores a gasolina y factores de emisión de CO₂ del AP 42 de la Environmental Agency Protection (EPA, 2000).

A continuación se muestra cada una de las variables que se tuvieron en cuenta para el modelamiento. Con la reelaboración del diagrama causal se obtiene lo que es el diagrama de niveles y flujos (Figura 3). Este modelo presenta 6 variables de nivel, o variables que representan una acumulación en el tiempo, las cuales son los aspectos ambientales y los tres eslabones de la cadena de suministro propuesta.

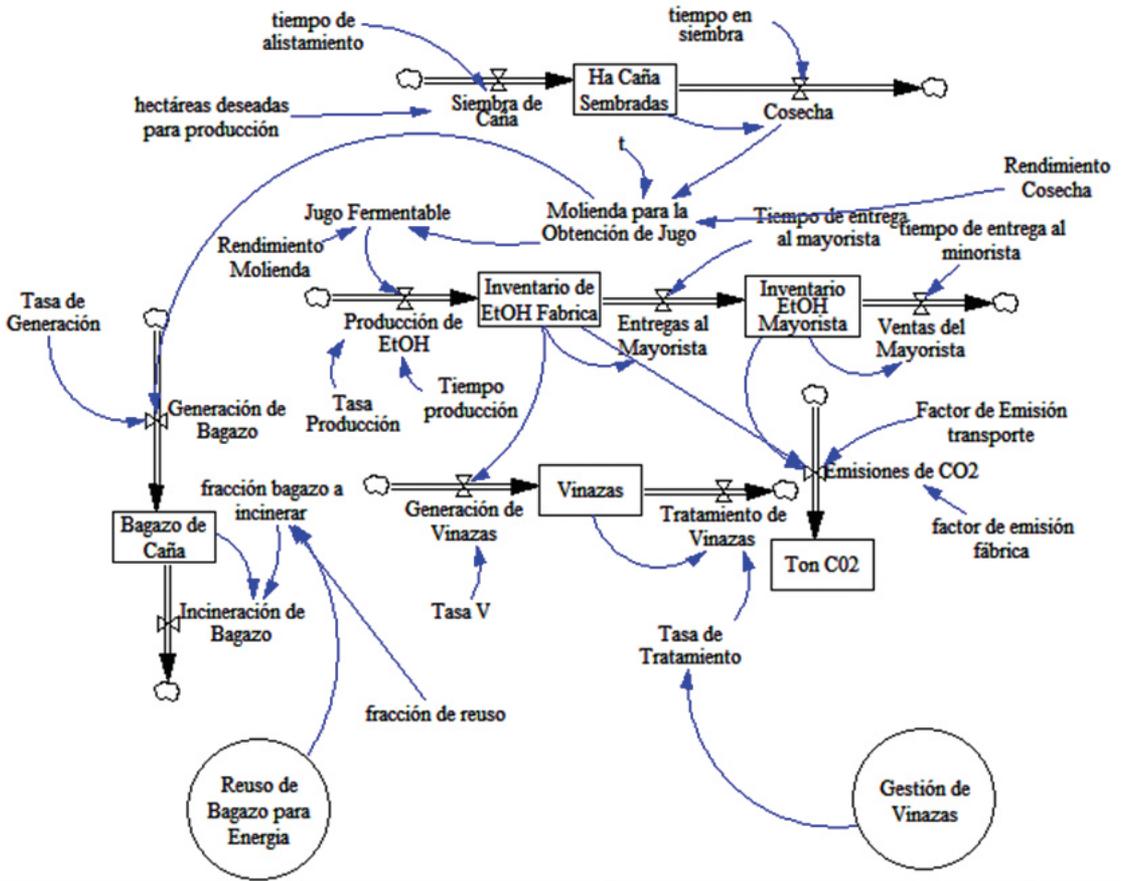


Figura 3. Diagrama de Niveles y Flujos del Modelo propuesto

Ecuaciones de Estado del Modelo

El resultado de la elaboración formal del modelo representado en un diagrama de niveles y flujos es la obtención del modelo matemático que permita observar el comportamiento del sistema estudiado. Las ecuaciones diferenciales obtenidas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de estado del modelo

Denominación	Ecuación
Hectáreas (<i>Ha</i>) de Caña Sembrada	$\frac{dHa}{dt} = (\text{Hectareas Producción} - \text{Tiempo de Alistamiento}) - \text{SMOOTH}(Ha, \text{tiempo en Siembra})$
Inventario de Bioetanol en Fábrica (<i>Inv. F</i>)	$\frac{dInv.F}{dt} = [\text{SMOOTH}(\text{Jugo fermentable} * \text{Tasa de Producción, tiempo de producción})] - [\text{SMOOTH}(Inv.F, \text{tiempo entrega Mayorista})]$
Inventario de Bioetanol del Mayorista (<i>Inv. M</i>)	$\frac{dInv.M}{dt} = [\text{SMOOTH}(Inv.F, \text{tiempo entrega Mayorista})] - [\text{SMOOTH}(Inv.M, \text{tiempo entrega minorista})]$
Bagazo de Caña (<i>BC</i>)	$\frac{dBC}{dt} = (\text{Molienda} * \text{Tasa de Generación}) - (BC * \text{Fracción a Incinerar})$
Vinazas (<i>V</i>)	$\frac{dV}{dt} = (Inv.F * \text{Tasa de vinazas}) - \text{Tratamiento de Vinazas}$
Toneladas (<i>Ton</i>)	$\frac{dTon}{dt} = (Inv.M * \text{Factor de Emisión de Transporte}) + (Inv.F * \text{Factor de Emisión de Fábrica})$

Nota: SMOOTH es una función del software Vensim, para representar retardos de materiales en los modelos construidos con Dinámica de Sistemas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la simulación del modelo propuesto, se utilizó el software libre Vensim Ple. El periodo de simulación del modelo se registra diariamente durante 60 días, teniendo en cuenta que la producción de bioetanol es diaria. El método de integración utilizado es el Runge-Kutta 4 con tamaños de paso de 0,0625. Las variables ambientales consideradas en el modelo, tales como bagazo de caña, vinazas y emisiones de CO₂, se encuentran en función del rendimiento de cada una de las etapas de la cadena propuesta, es decir, Molienda de caña inventario de fábrica e inventario del mayorista. En el resultado de las simulaciones se observa el comportamiento en el tiempo de las variables incluidas en el modelo (Figura 4). Estos resultados muestran una similitud a la realidad, ya que la producción de bioetanol está relacionada directamente con la generación de bagazo, vinazas y emisiones de CO₂. El bagazo que se genera por la molienda de caña está en constante crecimiento, ya que siempre hay molienda para obtención de jugo fermentable. En cuanto a las vinazas, la simulación muestra un comportamiento esperado, ya que la generación de este líquido residual está asociada a la cantidad de litros de bioetanol producidos a diario; es por esto que la evolución temporal de estas dos variables se encuentra acoplada. De igual manera ocurre con el inventario del mayorista y las emisiones de CO₂, ya que las condiciones dadas suponían que al existir mayor distribución por parte del mayorista, necesariamente iba a incrementar las emisiones provenientes de transporte.

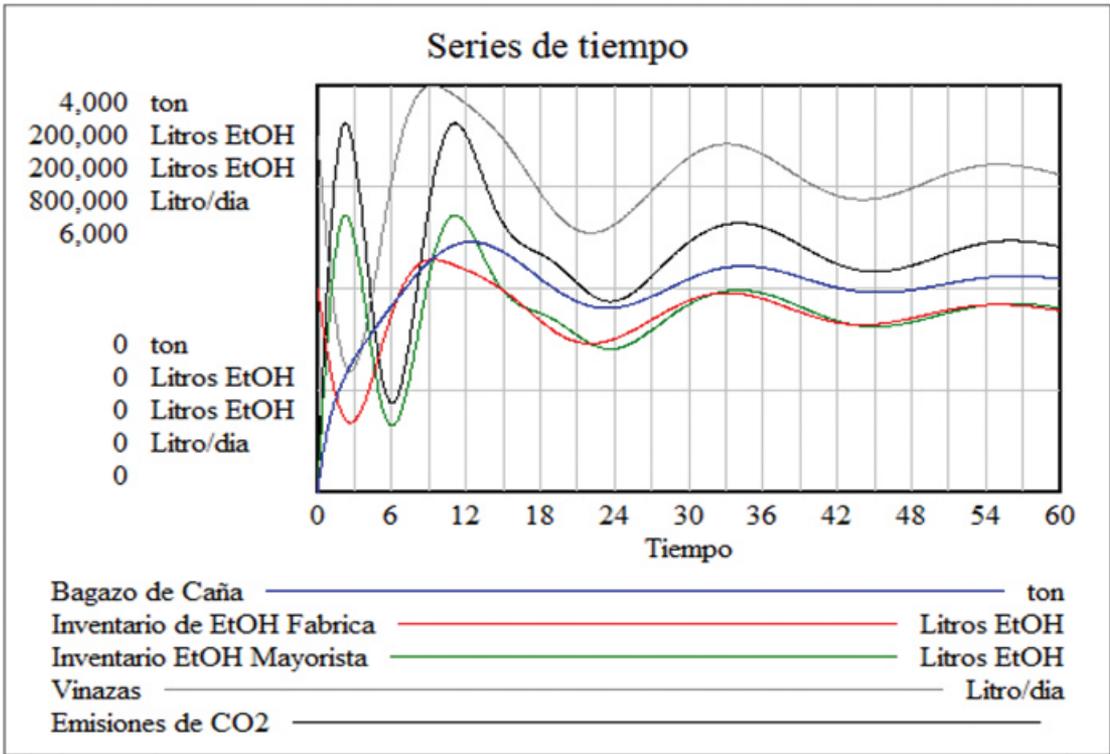


Figura 4. Simulación del Modelo en Vensim.

En el inventario de la fábrica y del mayorista se observa un comportamiento esperado de una cadena de suministro clásica, con oscilaciones en el tiempo producidas por el retardo de materiales en cada una de las etapas, es decir, por el tiempo que se demora la cosecha, el tiempo de producción y el tiempo de entregas al mayorista. Esto se ve reflejado en el comportamiento de la generación de sus aspectos ambientales asociados. Para esta simulación no se tuvo en cuenta ningún tratamiento posterior para las variables ambientales. Este tipo de industrias debe incluir obligatoriamente planes de gestión ambiental que permitan mitigar el impacto ambiental asociado a estos aspectos ambientales, pues la cantidad generada es muy grande, lo que representaría costos elevados para su compensación.

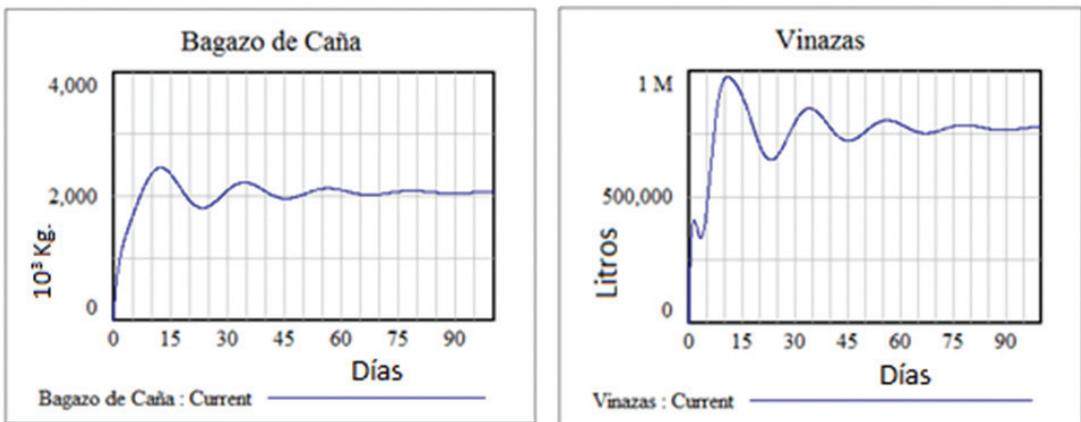


Figura 5. Simulación de los residuos con la gestión ambiental.

En el escenario 2 de la simulación se incluyeron las políticas ambientales de gestión de vinazas y reuso de bagazo para energía; de esta manera se observa la disminución de la cantidad de estos residuos (Figura 5). Esto se vería representado en ahorro de costos por energía y mitigación del impacto causado sobre el cuerpo hídrico donde se viertan las aguas residuales finales.

Validación del Modelo con un Ingenio en Colombia.

En la tabla 2 se presentan las simulaciones del modelo con algunos datos mostrados por la federación nacional de biocombustibles (2013), sobre la producción de bioetanol. Para esto se tomó un ingenio con una capacidad instalada de producción de 100000 litros por día.

Tabla 2. Datos de validación.

	caña sembradas (Ha)	Capacidad de Molienda (ton/día)	Capacidad Producción de Bioetanol (l/día)
año 2012	3000	5000	100000
año 2013 (Marzo-Julio)	Caña Sembradas (Ha)	Promedio de Molienda real	Promedio de Producción de Bioetanol real
	2886	4500	81000

Fuente: Fedebiocombustibles (2013)

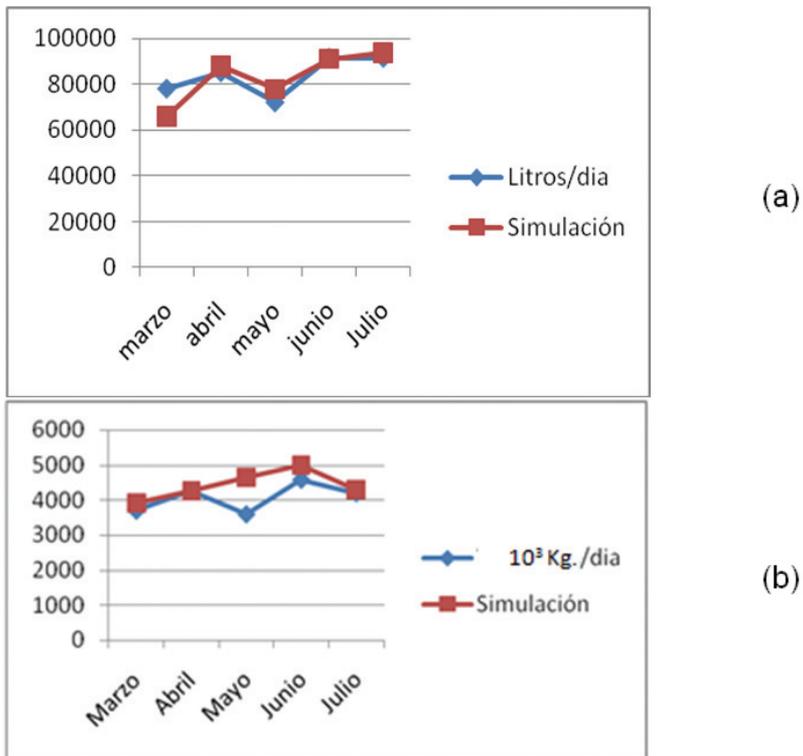


Figura 6. Comparación entre datos históricos y datos de simulación. a. Producción de Bioetanol. b. Capacidad de Molienda de Caña.

De acuerdo con la figura 6, (El eje X representa toneladas de caña molidas en un día y el eje Y los meses que se simuló el modelo) se puede observar que los valores reales de producción de bioetanol y capacidad de molienda son similares a los valores simulados para el período de marzo a julio del año 2013. Esto refleja que el modelo construido se aproxima a la realidad en estas variables. Sin embargo, es necesario realizar estas validaciones para distintos escenarios de producción, a los cuales se vincule los aspectos ambientales estudiados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del modelo teórico planteado se puede concluir que, sobre la cadena de suministro del bioetanol proveniente de la caña de azúcar, se debe incluir la gestión ambiental como política de manejo, ya que si no se implementa ningún plan de manejo ambiental, (medidas de prevención, mitigación, corrección) la producción de éste tendría una gran implicación negativa sobre el medio ambiente, y otras desde el punto de vista económico que aún no fueron estudiadas.

Si bien es cierto, este modelo no muestra toda la cadena con sus aspectos ambientales, representa una primera aproximación por parte de los autores para vincular las variables ambientales en las cadenas de suministro, que muchas veces no son tenidas en cuenta y que hoy en día se hace necesario asociarlas para conocer su impacto sobre el ambiente, de tal manera que se pudieran reestructurar para llegar a tener cadenas de suministro verde o sostenibles.

La Dinámica de Sistemas resulta una poderosa herramienta para entender sistemas dinámicos en que hay intercambio de información y materiales, como lo son las cadenas de suministro. Si bien es cierto que ya se ha utilizado para el modelamiento de cadenas de suministro, aún no existen modelos de este tipo que vinculen las variables ambientales.

El modelo desarrollado sólo presenta algunos aspectos ambientales de la cadena de suministro; es necesario incluir las emisiones de CO₂ relacionadas con el cambio de uso del suelo. De igual manera, es necesario vincular el costo de la implementación de estas estrategias ambientales, y qué costo generaría sobre la cadena de suministro.

El modelo obtenido sería enriquecedor estudiarlo con la teoría de los sistemas dinámicos, para mejorar la toma de decisiones en la gestión de cadenas de suministro.

El modelo propuesto es un paso importante para lograr la sostenibilidad en cadenas de suministro de biocombustibles en Colombia, como lo establece la política colombiana de fomento de biocombustibles.

REFERENCIAS

ASOCAÑA. Aspectos Generales del Sector Azucarero Colombiano 2011 - 2012 Informe Anual. 2012. Disponible en:<<http://www.asocana.org/modules/documentos/9771.aspx>>

ASLAN, B., STEVENSON, M., and HENDRY, L.C. Enterprise Resource Planning Systems: An Assessment of Applicability to Make-to-Order Companies. *Computers in Industry*, 2012 vol. 63, no. 7, pp. 692-705.

CAMPUZANO, F., MULA, J., and PEIDRO, D. FUZZY Estimations and System Dynamics for Improving Supply Chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 2012, vol. 161, no. 11, pp.1530-1542.

EPA -Environmental Agency Protection. Emissions factors & ap 42, compilation of air pollutant emission factors. 2000. Disponible en: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>>

FORRESTER, J. Industrial Dynamics. Pegasus Communications. 1999 Inc. Waltham.

FORRESTER, J. Urban Dynamics. Pegasus Communications. 1969 Inc. Waltham.
Fedebiocombustibles. Cifras Informativas del Sector Biocombustibles. Etanol de caña anhidro. 2013. Disponible en: <[http://www.fedebiocombustibles.com/files/Cifras%20Informativas%20del%20Sector%20Biocombustibles%20-%20ETANOL\(55\).pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/files/Cifras%20Informativas%20del%20Sector%20Biocombustibles%20-%20ETANOL(55).pdf)>

GAINES, B.R. Knowledge-Support Systems. Knowledge-Based Systems, 1990. vol. 3, no. 4, pp. 192-203

GEORGIADIS, P., and BESIOU, M. Sustainability in Electrical and Electronic Equipment Closed-Loop Supply Chains: A System Dynamics Approach. Journal of Cleaner Production, 2008, vol. 16, no. 15, pp. 1665-1678.

GEORGIADIS, P., VLACHOS, D., and IAKOVOU, E. A System Dynamics Modeling Framework for the Strategic Supply Chain Management of Food Chains. Journal of Food Engineering, 2005 vol. 70, no. 3, pp. 351-364.

GÓMEZ, J., SAMANIEGO, J., and ANTONISSEN, M. Consideraciones Ambientales en torno a los Biocombustibles Líquidos. Santiago de Chile: CEPAL 2008 Serie Medio Ambiente y Desarrollo, no. 137.

HEISKANEN, E., and JALAS, M. Dematerialization through Services: A Review and Evaluation of the Debate. Ministry of the Environment Helsinki 2000

KOMOTO, H.M., *et al.* Life Cycle Simulation for Analyzing Product Service Systems. Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, EcoDesign 2005. In: Fourth International Symposium (2005: Tokyo, Japan) pp. 386-393.

LIZCANO, P., and MORA, L.M. Las Vinazas de Destilería de Alcohol. Contaminación Ambiental o Tratamiento para Evitarlo. In: VIII Encuentro de Nutrición y Producción de Animales Monogástricos (2005).

MINEGISHI, S., and THIEL, D. System Dynamics Modeling and Simulation of a Particular Food Supply Chain. Simulation Practice and Theory, 2000, vol. 8, no. 5, pp. 321-339

NAIM, M.M. The Impact of the Net Present Value on the Assessment of the Dynamic Performance of E-Commerce Enabled Supply Chains. International Journal of Production Economics, 2006, vol. 104, no.2, pp. 382-393.

NUNES, V.T., SANTORO, F. M., and BORGES, M.R. A Context-Based Model for Knowledge Management Embodied in Work Processes. Information Sciences, 2009 vol. 179, no. 15, pp. 2538-2554.

ÖZBAYRAK, M., PAPADOPOULOU, T.C., and AKGUN, M. Systems Dynamics Modelling of a Manufacturing Supply Chain System. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, vol. 15, no. 10, pp. 1338-1355.

PORTER, Michael. What Is Strategy? Harvard Business Review, 1995, vol. 74, no.6, 61-78.

PORTER, M.E., and VAN DER LINDE, Claas. Green and Competitive: Ending the Stalemate. Harvard Business Review, 1995, vol. 73, no.5, pp.120-134.

RAMÍREZ, S., *et al.* Impacto en las decisiones de la cadena de suministros de una empresa de confección de prendas deportiva acuáticas con la utilización de dinámica de sistemas. Revista Ingeniería Industrial, 2010, Año 9, no. 1, pp.67 – 85, Chile.

SAEED, K. Trend Forecasting for Stability in Supply Chains. Journal of Business Research, 2008 Vol. 61, No. 11, pp. 1113-1124.

SARKIS, J. A Strategic Decision Making Framework for Green Supply Chain Management. Journal of Cleaner Production, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 397–409.

SPRINGER, M., and KIM, I. Managing the Order Pipeline to Reduce Supply Chain Volatility. European Journal of Operational Research, 2010, vol. 203, no. 2, pp. 380-392.

SRIVASTAVA, S. Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. International Journal of Management Reviews, 2007 Vol. 9, No. 1, pp. 53-80.

STERMAN, J.D. Business Dynamics, Systems Thinking and Modelling for a Complex World. McGraw Hill. 2000

SU, Y., and YANG, C. Why are Enterprise Resource Planning Systems Indispensable to Supply Chain Management? European Journal of Operational Research, 2010, vol. 203, pp. 81–94.

TAKO, A., and ROBINSON, S. The Application of Discrete Event Simulation and System Dynamics in the Logistics and Supply Chain Context. Decision Support Systems, 2012, vol. 52, no. 4, pp. 802-815.

TOWILL, D. Industrial Dynamics Modelling of Supply Chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 1995, vol. 26, no. 2, pp. 23–42.

VERBRAECK, A., and VAN HOUTEN, S. From Simulation to Gaming: an Object Oriented Supply Chain Training Library. In Proceedings of the Winter Simulation Conference (2005) pp. 2346-2354.

VLACHOS, D., GEORGIADIS, P., and IAKOVOU, E. A System Dynamics Model for Dynamic Capacity Planning of Remanufacturing In Closed-Loop Supply Chains. Computers & Operations Research, 2007, vol. 34, no. 2, pp.367-394.

ZHAI, L.; KHOO, L., and ZHONG, Z. Design Concept Evaluation in Product Development using Rough Sets and Grey Relation Analysis. Expert systems with applications, 2009, vol. 36, no. 3, pp. 7072-7079.