

CAPÍTULO 3

**GESTIÓN SISTÉMICA DE CADENAS DE
SUMINISTRO**

Introducción

En un mundo globalizado, las distintas economías buscan mantener una posición competitiva, lo cual, representa una serie de desafíos de carácter local y regional. Estos desafíos, se encuentran encaminados principalmente, hacia la inserción mundial, requiriendo de la generación de interconexiones, considerando a su vez, un apropiado equilibrio local.

En la medida en que el desarrollo de una región o de una localidad, depende directamente de la competitividad de las empresas que allí se desarrollan, es importante resaltar que, al momento de analizar los flujos de recursos procedentes del sector productivo, se requiere de la revisión de tres aspectos esenciales, siendo éstos, el progreso técnico, visto como el eje de las nuevas formas de producción que permiten el incremento de la productividad; las políticas activas de distribución del ingreso que incentivan la optimización de los recursos, con lo que se mejora el ingreso y se potencia el mercado interno; y finalmente, el comercio exterior, como motor impulsor de la transformación y expansión mercantil (García, 2006).

La gestión apropiada de la cadena de suministro se transforma en un factor diferenciador de amplia incidencia, tanto a nivel regional como local, que tradicionalmente ha sido relacionado con los procesos de adquisición y comercialización (Stevens, 1990). Lo anterior, tiene repercusiones directas en la productividad, a partir de los procesos relacionados con la gestión de materias primas; en lo relacionado con la optimización de recursos, mediante el desarrollo del mercado interno con respuestas ágiles a los consumidores de bienes intermedios y finales; y en el comercio exterior, considerando una mejor interconexión y flujo de importaciones y exportaciones.

Desde esta perspectiva, se aborda la cadena de suministro en cuanto al contexto estratégico y operativo, como un todo sinérgico, enfocando el análisis en la estructura sistémica en la que se genera el flujo de recursos.

El término “Cadena de Suministro” se plantea como la secuencia de eventos dentro del ciclo de vida de un producto o servicio, desde que se concibe hasta el momento de consumo (Blanchard, 2007), con lo cual, al momento de abordar su análisis, se debe considerar la complejidad directamente asociada al número de actores que participan, en conjunto con sus interacciones.

Estas interacciones, requieren del análisis de los diferentes procesos involucrados en la satisfacción de las necesidades del cliente, tanto de manera directa como indirecta, incluyendo los procesos desarrollados por diferentes tipos de proveedores, bodegas, líneas de producción, almacenes de productos terminados, canales de distribución, mayoristas, minoristas y el cliente final, en el marco de los negocios internacionales y de sus exigencias operacionales (Daniels, Radebaugh, & Sullivan, 2015).

Algunos de los procesos inmersos en la cadena de suministro, se encuentran representados por el desarrollo de nuevos productos, la mercadotecnia, las operaciones, la distribución y el servicio al cliente, siendo procesos enfocados a la recepción y cumplimiento de las peticiones del cliente, generando una serie de eslabones que integran las cadenas de valor de diferentes organizaciones empresariales, iniciando con materias primas no procesadas y terminando con el consumidor final, quien utiliza los productos terminados.

Esta integración de eslabones no se limita a empresas manufactureras, sino que incluye tanto “productos tangibles” como “servicios intangibles” que llegan al consumidor, y que requieren a su vez de insumos de productos y servicios.

De igual forma, las características de la cadena de suministro de una organización se encuentran directamente relacionadas con el tipo de organización, presentándose tres tipos básicos, como son, empresas de servicios, industriales y comercializadoras.

Las empresas de servicios poseen cadenas de suministro cortas y, por ende, menos complejas; las empresas industriales presentan cadenas de suministro de alto componente logístico, en concordancia con el tipo de materias primas que utilizan sus líneas de producción y los segmentos de mercado hacia los que van dirigidos sus productos; mientras que, las

empresas comercializadoras tienden a manejar bajos niveles de stock, requiriendo de análisis permanente en cuanto a la rotación del inventario.

Internamente, la cadena de suministro de cualquier organización funciona como una plataforma de conexión de los diferentes procesos, que dan respuesta a los requerimientos de los clientes, alineando las operaciones con el servicio al cliente, reduciendo los tiempos del ciclo de diseño/producción/comercialización y minimizando el capital necesario para operar.

Lo anterior, se visualiza mediante el análisis de las funciones comerciales, de suministro de insumos, de producción y de distribución, a las cuales es posible imprimir una serie de filosofías innovadoras en la búsqueda de la satisfacción del cliente a lo largo de los diferentes eslabones que la conforman.

En este sentido, la cadena de suministro presenta características enmarcadas en un sistema complejo, en el que prevalece la búsqueda de la satisfacción de cada uno de los actores presentes en los diferentes eslabones, con una mayor importancia del consumidor final; esto, manteniendo un flujo constante de información, productos, y recursos entre los diferentes eslabones, con momentos de acumulación, que requieren de análisis de los flujos para efectos de realimentación y mejoramiento.

De acuerdo con Chopra y Meindl (2007), las anteriores características se encuentran representadas por una serie de procesos macro, como son, la administración de las relaciones con los proveedores incluyendo la selección y evaluación de proveedores, la negociación de contratos, las compras, la colaboración en el diseño y la colaboración en el suministro; la administración de la cadena de suministro interna incluyendo, la planificación estratégica, planificación de la demanda, planificación del abastecimiento, cumplimiento en el procesamiento de órdenes y cumplimiento en el servicio; y finalmente, la administración de las relaciones con los clientes incluyendo, marketing, fijación de precios, ventas, servicio al cliente, y administración de órdenes.

3.2 Representación sistémica de cadenas de suministro vía Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas es una metodología de modelamiento matemático de tipo dinámico, determinista y sistémico, creada por el

profesor emérito del MIT Jay Forrester en la década de los 1950's para la comprensión, diseño y gestión del cambio en la actividad industrial, sin embargo, ya se ha demostrado su utilidad en otros campos de interés social, económico y/o ambiental, vea por ejemplo Sterman (2000), Redondo (2013), Ibarra y Redondo (2015).

Forrester formalmente presentó por primera vez la Dinámica de Sistemas en su obra de 1961 "Industrial Dynamics", con el objetivo de realizar diseño empresarial para crear políticas de gestión y estructuras organizativas más exitosas (Forrester, 1961). De este modo, mostró cómo las políticas, las decisiones, la estructura y los retardos se interrelacionan para influir en el crecimiento o estabilidad de los sistemas industriales, a partir de los, desde entonces posibles, "Laboratorios de Gestión vía simulación" (Forrester 1961).

De acuerdo con Forrester (1961), la metodología tiene como primer paso la identificación de los problemas y objetivos de la organización. El segundo paso es un modelo que muestre las interrelaciones de los factores significativos¹. Por último, los cambios propuestos pueden ser probados en el modelo, y el mejor de ellos se utiliza como guía para una mejor gestión.

En 1972, la Dinámica de Sistemas generó un alto impacto a nivel mundial porque a partir de ella se escribió "The Limits to Growth" en el cual se presentaron las conclusiones de los resultados obtenidos en las simulaciones computarizadas de un modelo de crecimiento exponencial de la economía y la población con recursos finitos denominado World3. El libro fue elaborado por Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jörgen Randers, y William W. Behrens III, y financiado por la Fundación Volkswagen por encargo del Club de Roma. En términos generales, en "The Limits to Growth" se concluye que nuestras formas de desarrollo nos conducirán a la extralimitación en la explotación de los recursos y, por lo tanto, al colapso como civilización. En Europa, bajo el liderazgo del profesor emérito de la Universidad de Sevilla Javier Aracil, se realizaron interesantes desarrollos académicos y de consultoría, siendo los académicos muy notables debido a que la Dinámica de Sistemas permite la construcción de sistemas de

² El modelo es una forma sistemática de expresar nuestra riqueza de conocimiento descriptivo sobre la actividad industrial, nos dice cómo el comportamiento del sistema resulta de las interacciones de sus partes (componentes). Estas interacciones son a menudo más importantes que las piezas tomadas por separado.

ecuaciones diferenciales y, por lo tanto, permite el desarrollo aplicado de muchas ramas de la matemática como la Teoría de los Sistemas Dinámicos No lineales, y la Teoría de la Viabilidad, por mencionar algunas.

La obra de referencia más importante de la Dinámica de Sistemas, tanto para el modelamiento de cadenas de suministro como para aquellos que apenas se acercan a la Dinámica de Sistemas, es sin lugar a dudas “Business Dynamics” del profesor John Sterman quien es considerado el líder de la escuela de pensamiento en Dinámica de Sistemas. En “Business Dynamics” se trata profundamente los aspectos más importantes de la Dinámica de Sistemas y cuenta con capítulos enteros dedicados al modelamiento de la cadena de suministro.

En esta sección presentaremos algunas generalidades de la Dinámica de Sistemas para la elaboración de modelos, vea sección 3.2.1. *Dinámica de Sistemas (generalidades)* y presentaremos recomendaciones especiales para el modelado de cadenas de suministro, vea sección 3.2.2. *Ejemplo de implementación con un inventario de materias primas*, partiendo de las ideas fundamentales propuestas por Jay Forrester, Javier Aracil y John Sterman en sus obras.

Dinámica de Sistemas (generalidades)

En Dinámica de Sistemas se parte del concepto fundamental de “sistema”. Comúnmente se dice que un sistema es un conjunto de elementos en interacción. Aracil y Gordillo (1997) definen sistema como una pareja de elementos (X,R) en la que X es un conjunto no vacío y R es una única relación definida sobre los elementos de X . Esta definición es importante porque deja en claro que la combinación de relaciones da lugar a la representación de sistemas distintos, por ejemplo, dos personas pueden estar vinculadas por una relación familiar y por otra laboral, lo cual en la representación correspondería a dos sistemas distintos que dan lugar a dos tipos de comportamiento distinto, aunque se trata de los mismos dos elementos.

Los sistemas que se construyen en la Dinámica de Sistemas denotan a sus partes como “atributos”, definidos como los preceptos del sistema, mientras que la relación que los articula es de tipo causal. De este modo, dos atributos A y B de un sistema se dice que están vinculados si existe una relación de causa efecto entre ellos, por ejemplo, desde A hasta B , en cuyo

caso se dirá que A es la causa y B es la consecuencia, y será notado como sigue:

$$A \rightarrow B \text{ (1)}$$

que se lee, el cambio en A produce cambios en B .

Conservando la idea de A como causa y B como consecuencia, es recomendable asumir que el cambio en la causa A sea positivo y observar si la consecuencia B aumenta o disminuye (si no aumenta ni disminuye no sería causal). Cuando el cambio en la consecuencia es positivo se denota:

$$A \rightarrow^+ B \text{ (2)}$$

siendo denominada como relación causal positiva, mientras que, para el cambio negativo de la consecuencia, se denota como sigue:

$$A \rightarrow^- B \text{ (3)}$$

que se denomina relación causal negativa.

Como ejemplo ilustrativo de la manera de representar un sistema a partir de relaciones causales, consideraremos una situación típica a la que se exponen las cadenas de suministro como elemento del mercado. Es bien sabido que el incremento de la oferta sobre la demanda, denominado margen de reserva, provoca la disminución del precio. Además, se sabe que el incremento del precio provoca la disminución de la demanda. De esta manera, el incremento de la demanda disminuye el margen de reserva. Las siguientes relaciones causales representarían las mencionadas afirmaciones:

$$\text{Margen de reserva} \rightarrow^- \text{Precio} \text{(4)}$$

$$\text{Precio} \rightarrow^- \text{Demanda} \text{(5)}$$

$$\text{Demanda} \rightarrow^- \text{Margen de reserva} \text{(6)}$$

Note que, accidentalmente, las relaciones causales presentadas en (4), (5) y (6) son negativas, es decir, mientras la causa aumenta, es posible establecer que la consecuencia disminuirá. Lo que no es posible verse, a primera vista, es que la composición de estas relaciones da lugar a una estructura de realimentación negativa, como la que se muestra en la Figura (6).

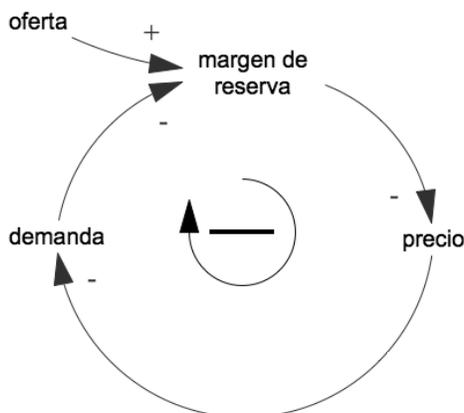


Figura 6. Bucle de realimentación negativa de un mercado

Fuente: *elaboración propia*

La realimentación se dice negativa porque al multiplicar los signos de cada una de las relaciones involucradas en el bucle de realimentación de la Figura (6), bajo las reglas usuales para el producto de signos, se obtiene que el signo es negativo².

Las estructuras de realimentación o bucles de realimentación tienen gran importancia en la representación de sistemas que se realiza con la Dinámica de Sistemas. Los bucles de realimentación negativa, como el de la Figura (6), expresan la tendencia del sistema a un estado de equilibrio, por lo que se denominan ciclos de balance. Por otro lado, los bucles de realimentación positiva muestran la tendencia del sistema a alejarse de un estado de equilibrio, haciendo crecer de manera sostenida el estado del sistema, por lo que se le denominan ciclos de refuerzo. La representación de todos los atributos del sistema con sus respectivas relaciones de causa-efecto, en la que preferiblemente se han identificado todas las estructuras de realimentación se denomina en Dinámica de sistemas el “diagrama causal”, la Figura (6) es un ejemplo de dicho diagrama causal.

Una vez se ha realizado la representación sistémica de los atributos, estableciendo sus relaciones causales e identificando las estructuras de

³ Una demostración rigurosa de este enunciado se encuentra en Sterman (2000).

realimentación, se debe clasificar los atributos en alguno de los siguientes elementos fundamentales de cualquier modelo matemático determinista: niveles (variables de estado), flujos (razones de cambio), variables auxiliares y parámetros, para constituir un nuevo diagrama denominado el “diagrama de niveles y flujos”.

El diagrama de niveles y flujos es una representación análoga de los sistemas hidráulicos en los que se tienen tanques de almacenamiento y válvulas con las que se llenan o vacían los mencionados tanques. En este diagrama, los niveles son las variables de estado y las válvulas o flujos las razones de cambio. Esta representación se construye “leyendo” el diagrama causal, de modo que son representaciones homólogas³, para lo cual se requiere entender qué significan los elementos fundamentales de modelado.

Los niveles o variables de estado son las cantidades variables a partir de las cuales observamos un sistema, por ejemplo, en un vehículo serían la velocidad, el número de revoluciones por minuto y el nivel de gasolina. La variable de estado $x(t)$ es, entonces, una cantidad que se acumula desde un cierto valor inicial $x(0)$ por la acción de un conjunto de razones de cambio F_i , lo cual se representa como sigue:

$$x(t) = x(0) + \int_0^t \sum_{i=1}^n F_i(t) dt(7)$$

Los flujos o razones de cambio son las puertas de entrada/salida del sistema, provocando los cambios en las variables de estado, por ejemplo, en un vehículo la velocidad cambia desde el accionar del acelerador (entrada de velocidad) y desde el accionar del freno (salida de velocidad). A las razones de cambio se les asocia una tasa de cambio que corresponde a “que tan abierta está la puerta”. Ejemplos de tasas de cambio son la tasa de producción, la tasa de compras de una cierta materia prima y la tasa de exportaciones del producto terminado.

La Figura (7) es un ejemplo de la representación utilizada en Dinámica de Sistemas para la variable de estado velocidad y las razones de cambio acelerar y frenar, siendo un diagrama de niveles y flujo.

⁴ A pesar que se propone iniciar el modelamiento matemático con Dinámica de Sistemas partiendo del diagrama causal para pasar al diagrama de niveles y flujos, es muy posible que la forma de aprehensión de muchos modeladores les facilite iniciar con el diagrama de niveles y flujos para pasar al diagrama causal, sin que ello signifique algo distinto a lo que en sí mismo significa un modelo: una forma de representar.

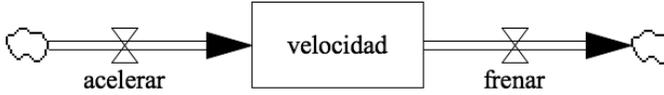


Figura 7. Diagrama de niveles y flujo de velocidad en un vehículo.

Fuente: *elaboración propia*

Las variables auxiliares, son cantidades variables que no son las variables de estado pero que condicionan los comportamientos del sistema, por ejemplo, en un vehículo las rotaciones de las llantas materializan las acciones del sistema, pero no se tienen en cuenta para visualizar el comportamiento del sistema. Se representan con una circunferencia en el diagrama de niveles y flujos.

Finalmente, se tienen los parámetros que son las cantidades constantes del sistema. Entre éstas suelen estar las tasas de cambio, las condiciones iniciales, los estados esperados del sistema (metas de indicador) y otros valores constantes del sistema.

Ejemplo de implementación con un inventario de materias primas

Veamos un ejemplo de inventarios para recrear la teoría en la Figura 8. Supongamos que contamos con un inventario de materias primas para producción cuyo abastecimiento está afectado por la compra de materias primas y por órdenes de producción. Las primeras alimentan el inventario, mientras que, las segundas lo desocupan. Causalmente se representaría de la siguiente manera:

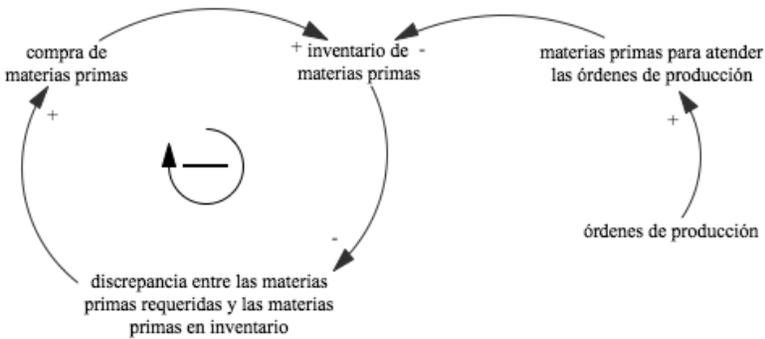


Figura 8. Diagrama causal de un inventario de materias primas.

Los atributos propuestos en la Figura 8 son interpretados como sigue: el inventario de materias primas es el nivel (variable de estado) porque a partir de él vemos la acumulación de interés en el sistema; la compra de materias primas y las materias primas para atender las órdenes de producción son los flujos (razones de cambio) porque hacen variar el inventario; la discrepancia entre materias primas requeridas y las materias primas en inventario es la variable auxiliar; las ordenes de producción son una función del tiempo que podría ser constante. La manera de representar esto se muestra en el diagrama de niveles y flujos en la Figura 9.

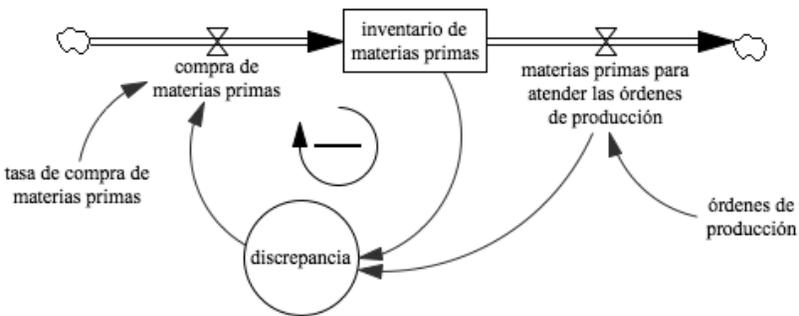


Figura 9. Diagrama de niveles y flujos de un inventario de materias primas.

Es importante resaltar que el diagrama de niveles y flujos de la Figura 9 es una posible interpretación del diagrama causal de la Figura 8, es decir, existen muchas maneras de interpretar un único diagrama causal, pero

esto también significa que el diagrama de niveles y flujos proviene de la representación causal realizada.

A partir del diagrama de niveles y flujos de la Figura 9 se consideran las siguientes ecuaciones:

Ecuación de nivel

$$\frac{d}{dt}I = CMP - MPOP(8)$$

donde I es el inventario de materias primas, CMP es la compra de materias primas y MPOP son las materias primas para atender las órdenes de producción.

Ecuaciones de flujo

$$CMP = a \cdot D (9)$$

$$MPOP = b \cdot OP (10)$$

donde a es la tasa de compra de materias primas, D es la discrepancia entre materias primas requeridas y las materias primas en inventario, b es la cantidad de materias primas que se requiere por orden de producción y OP son las órdenes de producción.

Ecuaciones de flujo

$$D = MPOP - I (11)$$

Modelo matemático

La composición de estas ecuaciones permite la obtención del modelo matemático que podría ser utilizado para el estudio del problema propuesto. El modelo matemático es el siguiente:

$$\frac{d}{dt}I = -I + (a - 1) \cdot OP(12)$$

Este modelo matemático es integrado con métodos numéricos para la obtención, vía simulación, de las trayectorias posibles del sistema. Se recomienda en este paso utilizar software especializado de Dinámica de Sistemas, en los que solo se requiere introducir las Ecuaciones (8-11) y

elaborar un tablero como el de la Figura (10) para realizar experimentos de gestión.

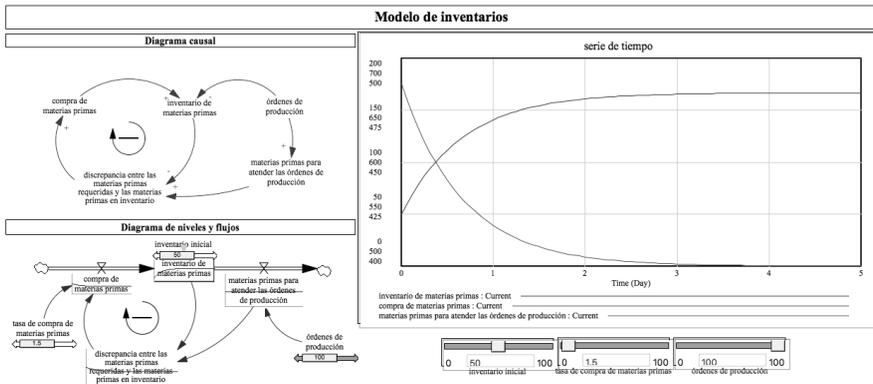


Figura 10. Tablero de control para el estudio de un inventario de materias primas.
Fuente: elaboración propia

Estudio de caso: la cadena de suministro de bioetanol en Colombia.

La producción de bioetanol en Colombia se encuentra distribuida lo largo de la cuenca del río Cauca en seis ingenios de producción, donde, se produce a partir de la caña de azúcar, siendo esto una característica económica a favor, pues 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 bioetanol o etanol anhidro. La cadena general como será tenida en cuenta en este estudio de caso se describe en la Figura (11).

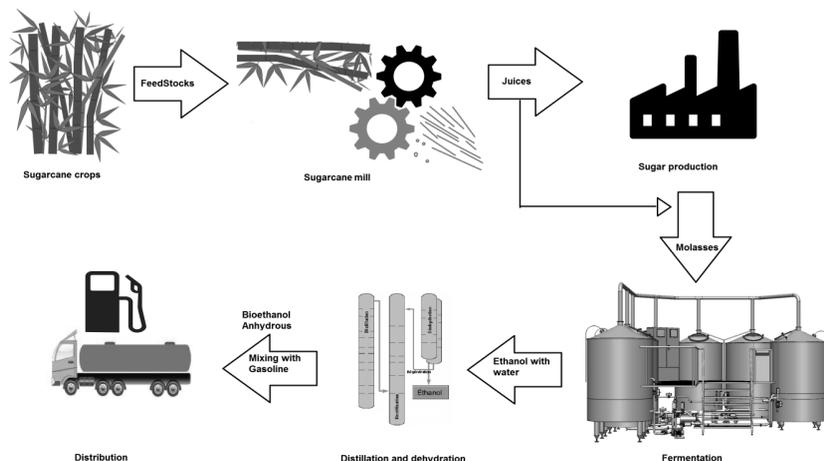


Figura 11. Cadena de suministro de Bioetanol de Caña.
Fuente: elaboración propia, basado en CUE (2012)

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). Al final 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 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).

El Proceso productivo

El bioetanol se fabrica mediante un proceso biotecnológico (Figura 12), 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 mediante su metabolismo natural.

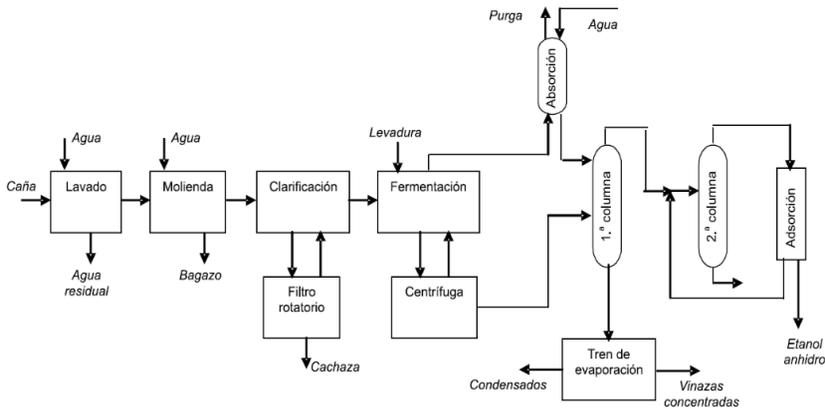


Figura 12. Etapas del proceso productivo de bioetanol.

Fuente: Sánchez (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 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.

Uso y mezcla de bioetanol en Colombia

Las políticas del gobierno colombiano, están orientadas a que la producción de bioetanol siga 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 primero 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 13). 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.

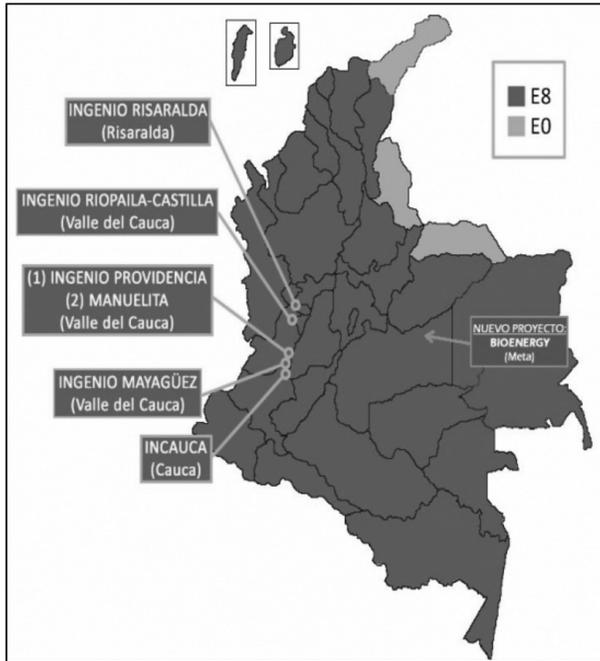


Figura 13. Porcentaje de Mezcla de Bioetanol en Colombia.
Fuente: *FedeBiocombustibles (2016).*

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 7).

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 7. Capacidad instalada de bioetanol en Colombia.

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

Fuente: Modificado de Fedebiocombustibles (2016)

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 14

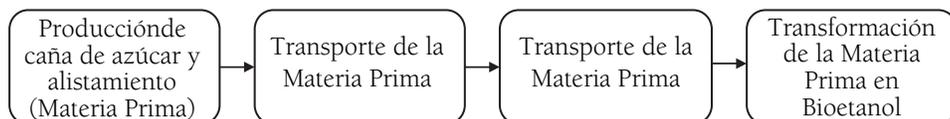


Figura 14. . Límite de la Cadena de Suministro de Bioetanol de caña.

Modelado de la Cadena

A continuación, se presentan y definen los principales atributos que fueron identificados para obtener y delimitar el sistema a estudiar de este Capítulo, los cuales, describen las partes generales que componen la cadena de suministro de bioetanol, y darán lugar al diagrama causal.

- 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 en 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 de la cadena de suministro. Cabe resaltar que para la lectura del diagrama causal se debe tener en cuenta lo expuesto en la sección 3.2.1. *Dinámica de Sistemas (generalidades)*.

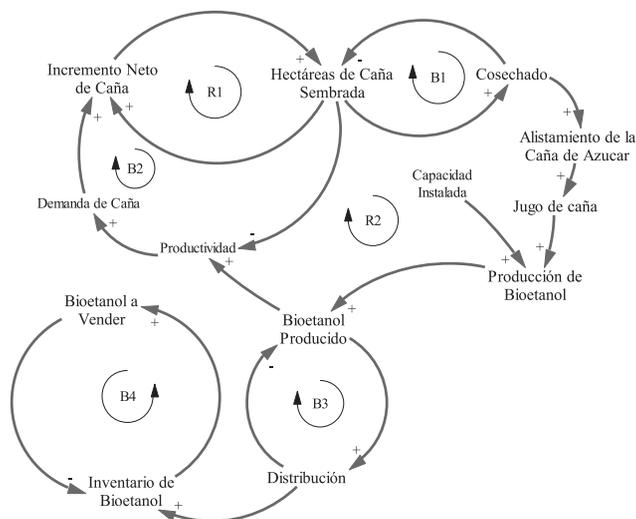


Figura 15. Diagrama Causal de la cadena de suministro de bioetanol.

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:

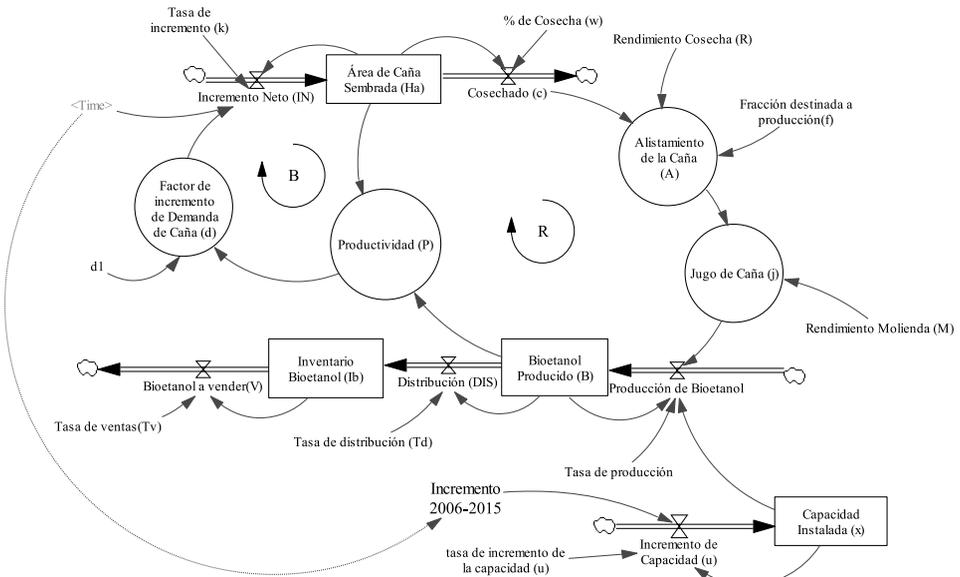


Figura 16. Diagrama de niveles y flujos de la cadena de suministro de bioetanol.
Fuente: elaboración propia

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:

$$\frac{dHa}{dt} = IN - C \quad (13)$$

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, como se presenta a continuación:

$$IN = \begin{cases} Ha + (Ha \cdot k) & \text{Si } t < t_i \\ Ha + (Ha \cdot k1) \cdot d & \text{Si } t \geq t_i \end{cases} \quad (14)$$

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:

$$C = Ha \cdot w \quad (15)$$

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:

$$\frac{dB}{dt} = \text{Producción de } B - DIS \quad (16)$$

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:

$$\text{Producción de } B = \begin{cases} x & \text{Si } B \geq x \\ j \cdot \text{tasa de } p & \text{Si } B < x \end{cases} \quad (17)$$

El parámetro tasa de producción $t1$ 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 R_c , la tasa de molienda TM y la fracción destinada a Bioetanol f , expresado así:

$$j = A \cdot M, \text{ donde } A = (R \cdot C) \cdot f(18)$$

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

$$\frac{dx}{dt} = s \quad (19)$$

$$s = \begin{cases} \text{Función tabla if } t < t_i \\ (x \cdot u) \text{ if } t \geq t_i \end{cases} \quad (20)$$

La variable de flujo Distribución DIS , está dada por:

$$DIS = B \cdot Td \quad (21)$$

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

$$\frac{dIb}{dt} = DIS - V \quad (22)$$

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

$$V = IB \cdot Tv \quad (23)$$

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 :

$$Productividad = \frac{B}{Ha} \quad (24)$$

$$Factor\ demanda = \begin{cases} f1 \text{ si } P \geq n \\ f2 \text{ si } P < n \end{cases} \quad (25)$$

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 8. Para esta simulación inicial se utilizó el software Vensim Ple. 7.1 con un periodo del 2006 al 2030.

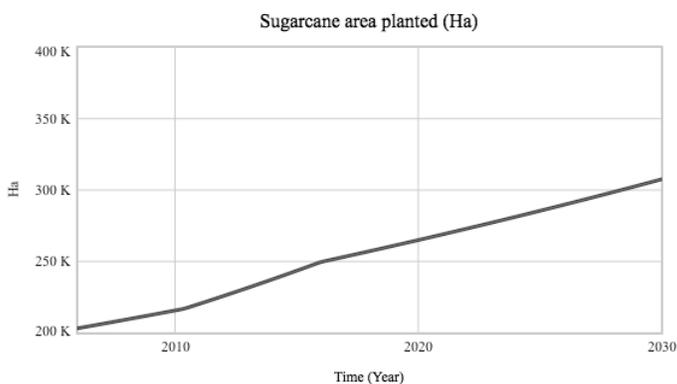


Figura 17. Simulación de las hectáreas de caña de 2006-2030.

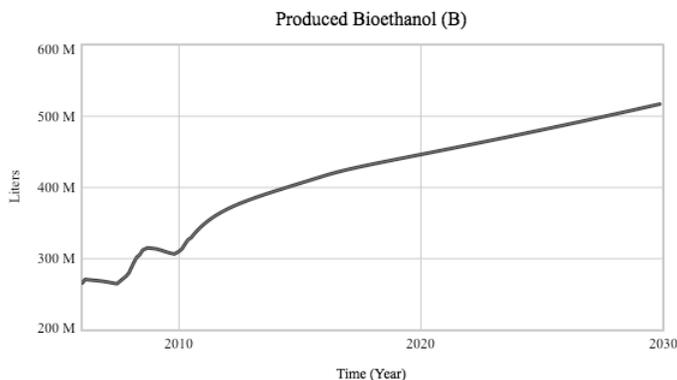


Figura 18. Simulación del bioetanol producido de 2006-2030.

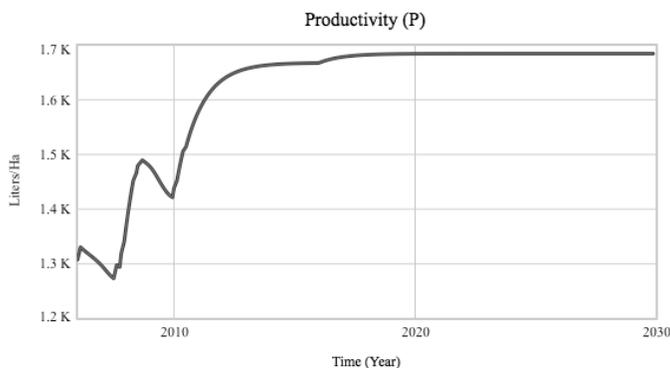


Figura 19. Simulación de la productividad.

Tabla 8. *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, 2016
Bioetanol producido	265.684	Miles de litros	FedeBiocombustibles, 2015

Fuente: *elaboración propia*

Referencias Bibliográficas

- García, J.G. (2006). Inserción exterior, transformación y desarrollo en la periferia. Cuadernos de Economía, Bogotá. 25(44): 57-99.
- Stevens, C. (1990). Successful Supply Chain Management, Supply Chain Decision, Vol.28, N° 8, pp. 25-31.
- Blanchard, D. (2007). Supply Chain Management Best Practices. Wiley, ISBN: 978-0-470-09721-2.
- Daniels, J., Radebaugh, L., & Sullivan, D. (2015). International Business, Environment and Operations. Pearson, 15th Edition.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply Chain Management Best Practices. Wiley, ISBN: 978-0-470-09721-2.
- Sterman, J. (2000). Business Dynamics, systems thinking and modeling for a complex world. Boston, USA. McGraw-Hill.
- Redondo J.M. (2013). Modelado de Mercados de Electricidad. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Ibarra, D., y Redondo, J.M., (2015). Dinámica de Sistemas, una herramienta para la educación ambiental en ingeniería. Revista Luna Azul, 41, 152- 164.
- Forrester, J. (1961). Industrial dynamics, M.I.T. Press.
- Aracil, J., y Gordillo, F. (1997). Dinámica de Sistemas. Editorial Alianza, primera edición.
- Ellis, R. D. y Merry, R. E., (2007). Sugarcane, second edition: Chapter 5 sugarcane agriculture. Oxford, UK.
- Glyn, J. (2007). Sugarcane, second edition. Oxford, UK.
- Consortio CUE, (2012). Capítulo II: Estudio ACV - Impacto Ambiental. Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo, Ministerio de Minas y Energía, Medellín.
- Fedebiocombustibles. (2016). Cifras Informativas del Sector Biocombustibles. [En línea] Etanol de caña anhidro en 2016.
- 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.