

**Incidencias Del Uso De Etanol Como Biocombustible En  
Colombia Sobre El Mercado De Los Derivados De La Caña De  
Azúcar: Una Aproximación Con Dinámica De Sistemas**

**ALINA XIOMARA TORRES FRANCO**

**Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de**

**Magíster en Ingeniería de Sistemas**

**Director**

**SANTIAGO ARANGO ARAMBURO**

**PhD System Dynamics - University Of Bergen, Noruega**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA – INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**SEDE MEDELLÍN**

**2012**

## DEDICATORIA

*A mi Familia, Refugio Inamovible independiente de las circunstancias y el tiempo*

*A Gustavo, Mi más bello regalo de vida*

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, gestor de todo lo que acontece en mi vida.

A la Universidad Nacional, por alimentar mis sueños y darme herramientas para cristalizarlos.

Al profesor Santiago, por su paciencia y confianza.

A los profesores de la maestría por dejar huella en mi transitar como profesional.

A mis amigos por valorarme en el Ser, más que en el Hacer.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE ANEXOS.....	8
RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 Demanda Energética Mundial.....	14
2.2 Dinámica del Mercado del Petróleo vs Demanda de Biocombustibles	14
2.3 Oferta de Biocombustibles en el Mundo .....	21
2.4 Aspectos Ambientales.....	27
2.5 Energías Alternativas .....	31
2.5.1 El Etanol como Energía Alternativa .....	32
2.5.2 Proceso De Extracción del Etanol .....	33
2.6 Biocombustibles en Colombia .....	35
2.7 Marco legal del Etanol en Colombia .....	36
3. ESTADO DEL ARTE .....	43
4. DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA .....	52
5. PROPUESTA METODOLÓGICA .....	54
5.1 Características del Sistema .....	54
5.2 Dinámica de Sistemas .....	55
5.3 Supuestos del modelo .....	58
5.4 Hipótesis Dinámica .....	60
5.4.1 Dinámica del Mercado del Azúcar .....	61
5.4.2 Dinámica del Mercado del Etanol .....	62
5.4.3 Interacción Mercado del Azúcar vs Mercado del Etanol....	63
5.5 Resultados de la Simulación (Escenario base).....	65
6. TRABAJOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla1. Países líderes en Capacidad de Producción de Etanol y Biodiesel.....	22
------------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura1. Proceso de Modelamiento Iterativo de Dinámica de Sistemas.....	58
Figura2. Esquema Macro del Sistema.....	60
Figura3. Dinámica del mercado del azúcar.....	61
Figura 4. Dinámica del mercado del Etanol.....	63
Figura 5. Interacción de los Mercados del Azúcar y Etanol.....	64
Figura 6. Producción de Etanol.....	66
Figura 7. Producción de Azúcar.....	67
Figura 8. Ventas de Azúcar.....	67
Figura 9. Precio del Azúcar.....	68

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Gráfica. Consumo de biocombustibles en miles de toneladas en Europa... 78

Anexo 2. Gráfica. Utilización del alcohol en China del 2006 al 2010..... 79

**Este trabajo es una versión ampliada del artículo presentado en la Revista Avances en Sistemas e Informática, el 28 de mayo del 2008. Publicación: Volumen 5, N°2 del 2008.**

## **RESUMEN**

En la última década, los biocombustibles se han convertido en una alternativa fuerte para los principales gobiernos del mundo, que les permita suplir sus necesidades de demanda energética, específicamente respecto al petróleo. Lo anterior, ha suscitado un sinnúmero de controversias respecto a su conveniencia tanto en el contexto ambiental como económico. A pesar de esto, países como Brasil y Estados Unidos, quienes llevan la vanguardia mundial en el tema, cada vez avanzan más en su investigación, lo que les ha permitido mejorar su productividad e incrementar su uso a nivel interno. Estados Unidos ocupa el primer lugar en producción de etanol proveniente del maíz, mientras Brasil que se ha especializado en la producción de etanol de caña de azúcar, ocupa el segundo lugar siendo el país con mayor consumo del mismo a nivel mundial.

Después de Brasil, Colombia es el segundo país de Latinoamérica que mayor interés ha mostrado en el desarrollo de ésta alternativa energética y ha venido incursionando progresivamente en los últimos 10 años en la producción y uso del etanol como biocombustible, sustentado en un marco jurídico que incluye lineamientos en los dos ámbitos. No obstante, ha tenido diversas implicaciones sobre el mercado de los derivados de la caña de azúcar, ya que una significativa porción de dicha materia prima, pasó a destinarse para un nuevo producto. Por tal motivo, es necesario comprender esta nueva dinámica y analizar el planteamiento de posibles intervenciones que mitiguen el efecto negativo que puede presentarse a mediano plazo, con la introducción de éstos cambios en la economía nacional.



En el presente trabajo, se propone un análisis e implementación de una primera aproximación a un modelo de simulación, para el estudio de los potenciales efectos adversos que representa para el mercado del azúcar, la introducción en Colombia de nuevas políticas gubernamentales respecto al biocombustible obtenido del Etanol derivado de la misma.

Se tienen en cuenta factores tales como el comportamiento de los precios del azúcar, la variación del número de hectáreas dedicadas al cultivo de la caña, la implementación de subsidios para la producción de etanol y el porcentaje de etanol mezclado en la gasolina establecido por el gobierno. Se plantean potenciales escenarios que pueden presentarse en este contexto, con el fin de analizar intervenciones viables que permitan prevenir y/o mitigar los posibles efectos nocivos que puedan derivarse de las interacciones al interior del sistema en estudio. Lo anterior, constituye una herramienta de apoyo en la toma de decisiones que conlleven a una mejora en la problemática presentada.

**Palabras clave:** Biocombustible, Etanol, Dinámica de Sistemas, Azúcar.

### **ABSTRACT**

In the last decade, Biofuels have turned into a strong alternative for the most important governments of the world, which allows them to replace their needs of energetic demand, specifically, in relation to oil. This has caused so many controversies about its desirability, especially in the environmental context as economics as well. Although this situation, countries like Brazil and The United States of America, who are the world leader in the field, are advancing more in his investigation, allowing them to improve his productivity and to increase his use at internal level. The United States of America are the first one in the production of ethanol from corn, while Brazil, who has specialized in the production of ethanol

from sugarcane, ranks second, being the country with the highest consumption worldwide.

After Brazil, Colombia is the second Latin American Country that has shown greater interest in the development of this energetic alternative and has been moving gradually on the production and use of ethanol like biofuel in the last ten (10) years, supported by a legal framework that includes guidelines in both areas. This situation has had multiple implications on sugarcane derivatives market, because an important portion of this raw material began to be used for a new product. The present work

The present work proposes an analysis and implementation of a first approach to a simulation model that study the potential negative effects that represents for sugarcane derivatives market, the introduction of new government policies about Biofuels obtained from ethanol in Colombia derived from the same.

Factors like the behavior of sugar price, the variation in the number of hectares used to cultivate sugar cane, the implementation of subsidies for ethanol production and the percentage of ethanol blended in gasoline set up by the Government. Potential scenarios that can be present in this context were defined, in order to analyze feasible interventions that let us prevent and / or mitigate the possible harmful effects that could stem from the interactions to the interior of the system in study.

This work constitutes a support tool in decision-making that lead to an improvement in the presented problematic.

**Keywords:** Biofuel, Ethanol, System Dynamics, Sugar.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del desarrollo de nuestras sociedades, los combustibles fósiles han desempeñado un papel fundamental. Su demanda a nivel mundial viene creciendo de forma significativa desde hace varios años, como consecuencia del estilo de vida de los países desarrollados.

Este tipo de combustibles son recursos No Renovables, siendo sus reservas de carácter finito [1]. Por tal motivo, se ha despertado un interés global por la búsqueda de fuentes alternativas que suplan la progresiva demanda de energía [2]. Una eventual fuente de energía es la biomasa, que supone la obtención de combustibles desde fuentes vivas. El Etanol, es uno de estos combustibles, el cual es producido a partir de los azúcares que se encuentran en variados productos vegetales (cereales, caña de azúcar, remolacha, maíz o trigo), siendo la caña de azúcar una de las principales fuentes de la que se extrae hoy en día.

Con el propósito principal de disminuir la dependencia del petróleo como fuente de energía, se ha ido incrementado a nivel mundial la producción de Etanol para usarlo como biocombustible. Es así como varios países de los diferentes continentes, están impulsando el uso de biocombustibles a nivel interno, con el establecimiento de metas de consumo a distintos plazos [3]. Dichos gobiernos, se han volcado hacia este tipo de alternativas que les permita romper la hegemonía en el uso de combustibles fósiles a la vez que contribuyen a la conservación del medio ambiente, mediante la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque esto último sigue aún siendo tema de controversia.

No obstante, los países industrializados, que tienen en su haber los más altos porcentajes de consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, no poseen las tierras propicias en calidad y extensión, para la producción requerida de biocombustibles que satisfaga las necesidades de su gran demanda energética [4].

Como respuesta a esta situación, se han planteado la posibilidad de importar dichos biocombustibles de países en vías de desarrollo, por lo cual, han venido incentivándolos a su producción, aprovechando el hecho de que éstos tienen grandes extensiones de tierras aptas para el cultivo, lo que aparentemente, les representa una posibilidad de desarrollo económico.

Colombia es un importante productor de caña de azúcar, ocupando en el 2008 el 17° puesto a nivel mundial en su producción, con un promedio aproximado en las últimos dos décadas de 895.220 Toneladas de azúcar crudo en exportaciones y unos excedentes de 74.286 Ton. Con base en el establecimiento de ciertas políticas, el país ha venido incursionando de forma progresiva en la producción y uso como biocombustible del Etanol proveniente de la caña de azúcar. Este nuevo uso del Etanol, trae repercusiones a diferentes niveles, como acontece por ejemplo, con la producción y consumo del azúcar derivado de la caña; en este sentido, podrían presentarse dificultades relacionadas con la satisfacción de la demanda interna de azúcar y una variación significativa de su precio en el mercado. [5]

Esta situación alberga una considerable complejidad, dados los diversos factores involucrados y las interrelaciones entre los mismos. Cómo influye el porcentaje de mezcla establecido por el gobierno sobre la demanda de Etanol, cómo se ve afectada la producción y precio de la caña de azúcar y sus derivados, al aumentarse la producción de Etanol para su consumo como biocombustible, son algunos de los elementos que deben considerarse.

Se hace pertinente un análisis profundo de la problemática, evaluando las consecuencias que se derivan de la implementación de ésta nueva política relativa a la producción y consumo de biocombustibles en el país, lo cual conviene ser estudiado en tiempo oportuno, con el fin de tomar las medidas correspondientes que permitan mitigar los efectos adversos que puedan presentarse.

Con la presente propuesta, se busca mediante la aplicación de una metodología, realizar un análisis de la problemática planteada, observándola desde la perspectiva de diferentes escenarios, partiendo de un escenario base y modificando las condiciones del mismo, para entender mejor el comportamiento del sistema que engloba la situación de estudio. Esto permitirá hacer una aproximación inicial a un modelo dinámico, que otorgue una mayor comprensión del problema y que a futuro posibilite la formulación de políticas correctivas que sean viables y que coadyuven a atenuar las posibles consecuencias adversas.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Demanda energética mundial**

Teniendo en cuenta las costumbres de las sociedades actuales, se hace evidente la gran importancia que para el mundo representa el sector energético como impulsor del desarrollo económico y social.

En la actualidad, con el escenario energético global se ponen en evidencia las marcadas divergencias entre los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo. De un lado, se tiene acceso a la energía comercial en todas sus facetas, y de otro, se es incapaz de satisfacer las más básicas necesidades energéticas.

El procesamiento, transporte y uso de las diversas fuentes energéticas generan múltiples impactos en el medio ambiente, y como consecuencia de ello se ha ido generando una ola de preocupación en el mundo, materializándose en el planteamiento de medidas de choque y compromisos de índole internacional en pro de la reducción de la contaminación actual. Uno de los más asiduos defensores de las políticas de reducción de emisiones ha sido la Unión Europea, a través de propuestas que abogan por el aprovechamiento de los recursos renovables e impulsan la eficiencia energética, en pro de mitigar su ya notable déficit en materia de energía.

### **2.2 Dinámica del Mercado del Petróleo vs Demanda de Biocombustibles**

Como consecuencia de la primera crisis petrolera acontecida en la década de los 70, el mercado de los biocombustibles comenzó a tener vida propia. En el año 1973 el precio del crudo se encareció extraordinariamente, afectando a todos los países del mundo, en especial a aquellos países cuyo alto consumo no se ve sustentado en reservas

propias y lo cual les hace depender de otros estados, para la satisfacción de su demanda.

El precio del petróleo ha sido uno de los principales factores que han tenido incidencia sobre la demanda de Biocombustibles. El aumento en los últimos años de la población mundial, sumado al incremento de la demanda energética de países emergentes como lo son Brasil y China, ha redundado en una variación del precio del crudo, lo que ha llevado a los países importadores a buscar otras fuentes alternativas de energía.

El precio del petróleo, está supeditado al comportamiento de una serie de elementos que lo determinan, tal es el caso de los factores climáticos, los eventos de índole político, la dinámica de los fondos de petróleo y las diversas interacciones entre consumidores, productores y las propias empresas petroleras. De igual forma se encuentra regulado por las leyes de la oferta y la demanda. Es así como el precio del petróleo pone de manifiesto los conflictos entre consumidores y productores y a nivel más macro, entre los países miembros de la OPEP y aquellos que no lo son, convirtiéndose entonces en un precio de origen netamente político en gran porcentaje.

En la pasada década, el petróleo presentó en su precio las mayores variaciones de la historia. Es así como en el año 2007 se alcanzó un valor de 97 USD por barril (alza del 100%) y con una posterior caída en 2008, llegando a un valor de 40 USD por barril, lo cual fue producto de la alta volatilidad de los mercados financieros, la fragilidad del dólar frente a otro tipo de divisas, la demanda creciente de energía, y finalmente, por la especulación que conlleva a la crisis. [6]

Esta inestabilidad en los precios del petróleo, tuvo impacto en particular sobre los países importadores del crudo, que se vieron en la necesidad de buscar otro tipo de alternativas energéticas como es el caso de los biocombustibles, los cuales representan actualmente cerca del 77 % de las energías de carácter renovable que son usadas hoy en

día y cuya cifra tiende a ser mayor con el tiempo, dada su accesibilidad a países de escasos recursos. [7]

Como energía renovable, los biocombustibles son flexibles y viables para su utilización a nivel mundial, en comparación con otras energías alternativas como la eólica, solar e hidráulica, las cuales son poco sostenibles y dependen además de factores externos para su pleno desarrollo. Esto convierte a los biocombustibles en una fuente de energía renovable bastante atractiva pues en términos generales no requieren de elevadas inversiones para su producción y comercialización.

El comercio del Etanol alcanzó una marca considerable de cerca de 8 mil millones de litros en el año 2006, lo cual fue principalmente ocasionado por medidas gubernamentales implementadas en Estados Unidos, respecto a la adición del aditivo MTBE a la gasolina, el cual pasó a ser reemplazado por el Etanol. Así mismo, otros países como Brasil, China, Japón y la Unión Europea, que también tienen políticas nacionales de inducción a la mezcla de etanol con la gasolina y del uso del biodiesel, han contribuido al auge de los biocombustibles como energía renovable. [8]

Estados Unidos afronta importantes retos respecto a su seguridad energética ya que la producción interna de energía no alcanza a suplir su demanda, haciéndose necesaria la importación de gasolina para el sostenimiento de su economía, lo cual representa un alto riesgo dada la volatilidad del Medio Oriente, región que posee más de la mitad de las reservas mundiales de petróleo. Por ello los biocombustibles se han convertido para Estados Unidos una fuente independiente de energía, de tal forma que en el 2005 fue emitida una ley que establece que para el presente año (2012) se deberían incorporar 7,5 mil millones de galones de biocombustibles en la gasolina. [9]



Los dos tipos de biocombustibles más consumidos en Estados Unidos son el Bioetanol producido a base de maíz y el Biodiesel producido a partir de residuos de grasa y aceite de soya. Éstos cubrieron el 2.8% del total de combustibles líquidos consumidos en el 2008, donde el Etanol lideró tanto en producción como en consumo, alcanzando a ser entre el 2009 y 2010 la energía renovable más consumida por el país. En el 2010, Estados Unidos se consolidó como el mayor productor de etanol del mundo, según el Centro Global de Biocombustibles. Su capacidad operativa fue de 13.470 millones de galones, con un aumento en su consumo del 53% desde el 2006 y con tendencia al crecimiento a futuro. [10]

A pesar del rápido crecimiento que muestran las anteriores cifras, siguen representando un porcentaje pequeño frente a los combustibles tradicionales, ya que éstos aún son más competitivos. Por ejemplo, el Biodiesel produce 9% menos energía que el Diesel convencional y el Etanol, posee también menos energía por galón respecto a la gasolina, por lo que se requiere 1,5 galones de etanol para generar la misma energía que un galón de gasolina. [11]

Con base en lo anterior, los expertos argumentan que los biocombustibles no serían viables si no existieran los subsidios que lo hicieran posible. Para el caso particular de Estados Unidos, la ley del 2005 otorga varios incentivos fiscales a consumidores y productores, en especial a aquellos considerados pequeños productores. Adicionalmente, en el 2006 el gobierno ha impulsado el uso de biocombustibles en los vehículos a través del crédito económico para aquellos compradores de automotores alternativos que funcionen con biocombustibles o cualquier otro tipo de energía renovable. De igual forma, la inversión de 150 mil millones de dólares en un plan para la investigación y desarrollo de tecnologías para la generación de energía de forma más eficiente y menos contaminante, ha sido otra de las políticas gubernamentales que han incentivado el uso de biocombustibles en Estados Unidos. [12]

Por su parte, Brasil ha sido pionero en la producción y consumo de biocombustibles. Inició la producción de Etanol en los años 30, cuando se estableció la normativa en el país que obligaba la mezcla de etanol tanto en la gasolina nacional como importada en una relación 5/95 (Etanol y Gasolina respectivamente). Éste auge tuvo un temporal estancamiento durante la segunda guerra mundial, debido al bajo precio de la gasolina. Pero una vez finalizada la guerra, tomó nuevamente impulso durante la primera crisis mundial petrolera, cuando el gobierno estableció el Programa Nacional de Alcohol, con el fin de seguir investigando las posibilidades del Etanol como fuente alternativa de energía. [13]

A partir de entonces, el consumo de biocombustibles siguió evolucionando en éste país, donde en el 2005 el Congreso emitió una ley que determinó la inclusión del biodiesel, estableciendo un porcentaje de mezcla del 2% hasta el 2007 y del 5% a partir del 2013. Igualmente se establecieron exenciones de impuestos a aquellas compañías productoras de Biodiesel, cuya materia prima provenga de cultivos de granjas familiares de escasos recursos.

De otro lado, la comunidad Europea estableció para el 2005 un porcentaje de mezcla del 2% de Etanol en la gasolina, con un aumento progresivo hasta llegar al 5% en el 2010. Dicho porcentaje constituyó un mercado de 8 mil millones de litros de Etanol, los cuales fueron consumidos principalmente por Alemania, Italia, Reino Unido, España y Francia. [Ver Anexo 1.]

Alemania se mantiene como el líder en consumo de biocombustibles en Europa. En el año 2009, consumió un total de 2'894.000 toneladas que representa el 23% del total en Europa, y a pesar del descenso presentado por la normativa del gobierno de reducción de cuotas de incorporación de biocombustibles a los carburantes (Variación del porcentaje de mezcla del 6.255 al 5.25%) el consumo aumentó nuevamente en el 2010,

una vez la norma estableció el retorno al porcentaje de mezcla inicial y su conservación hasta el año 2014. [14]

Por su parte, Francia con una representación aproximada del 20,8% del consumo total en Europa, usó cerca de 2'511.000 toneladas de biocombustibles en el mismo año. Con el favorecimiento de medidas legales que aumentan el gravamen a los combustibles fósiles e incorporan exenciones fiscales a fuentes de energía de carácter renovable, se ha observado un crecimiento en el consumo del 499,3% desde el año 2005. [15]

De otro lado, Italia con un consumo de 1'167.000 toneladas, ocupa el tercer lugar en consumo de Biocombustibles, representando el 9,7% del total en Europa y con un crecimiento aproximado del 559% en el quinquenio 2005-2010. Lo cual obedece principalmente a que la tasa de mezcla establecida, pasó en este lapso, del 2.4% al 3%.

El cuarto país en el ranking de mayores consumidores de biocombustibles en Europa lo ocupa España, con un consumo de 1'046.000 toneladas en el 2009 (el 8,75 del total en Europa). Tuvo un crecimiento del 669% desde el 2005, seguido por el Reino Unido que representa el 8,1% del total en Europa, con un consumo de 981.000 toneladas en el mismo año y con un crecimiento de 12 veces su valor desde el 2005. [16]

Pasando al continente Asiático, tenemos que el consumo de biocombustibles en China se comporta de una forma que difiere mucho de Europa, principalmente por razones que obedecen a la cantidad de población del país, que representa una muy alta demanda energética que el gobierno busca cubrir a través de diversas fuentes energéticas. Lo anterior está plasmado en el Plan 2006-2020 del país, que plantea como meta para el año 2020 un consumo de energía de tipo Renovable del 15%. Dicho Plan se propone un incremento en la producción de biocombustibles, pasando de 200.000 mil toneladas producidas en el 2010, a 2 millones de toneladas producidas en el 2020. Adicionalmente, el gobierno de China incentiva el desarrollo de Etanol y biodiesel que no provengan de productos destinados a la alimentación. [17]

Esto ha ocasionado que el Diesel sea el combustible más utilizado en China y que el Etanol sea también usado frecuentemente como carburante, desplazando su uso en la industria química a la par que aumenta su demanda en el país. [Ver Anexo 2.]

El gobierno de Japón, por su parte, optó por el establecimiento de un programa de biocombustibles por tres razones principales: cumplir con los compromisos que pactó en el Protocolo de Kioto con relación a los temas de limitación y disminución de las emisiones de dióxido de carbono en el lapso del 2008 al 2012; el incremento en los precios del crudo, teniendo en cuenta además que ostenta el tercer lugar a nivel mundial en consumo del mismo y es uno de los principales importadores y finalmente, por alcanzar el propósito de reducir la dependencia que tiene de la energía nuclear, la cual genera el 30% de la energía total del país.

Por su parte, La Estrategia Nacional de la Biomasa (Biomass Nippon Strategy) publicada en el 2002, tiene como principal propósito impulsar la industria de las energías alternativas. Dicha estrategia, incluye la firma de un acuerdo entre el banco del Japón para la Cooperación Internacional, con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento de Brasil, con el fin de establecer los lineamientos de un programa bilateral de Biocombustibles. [18]

Como consecuencia de ésta coalición, los flujos de inversión entre ambos países han aumentado, lo cual se evidencia en la inversión de empresas del Japón en el sector productivo Brasileño con el fin de desarrollar cultivos y tecnologías que hagan viable la disminución del precio final del Biodiesel y Etanol y de ésta manera poder importar productos de calidad a un precio inferior.

En el 2002, las compañías Petrobras y Nippon Alcohol Hanbai (de Brasil y Japón respectivamente) se aliaron para la creación de una empresa de nombre Nippon Ethanol, y posterior a esto, en el 2003 el gobierno del Japón establece la normativa

sobre el control de calidad para la gasolina y otros combustibles, donde se establece para el sector transporte, la mezcla de Etanol en la gasolina en una relación del 3%-97%.

Las anteriores cifras nos llevan a inferir que en su gran mayoría, los países que importan y consumen Biocombustibles son países desarrollados o en su defecto potencias emergentes que se caracterizan por poseer una alta demanda energética y tener alta dependencia del petróleo, lo que los obliga a ser grandes importadores del mismo. De igual forma, se pone de manifiesto que los biocombustibles abrieron un nuevo mercado y ganaron popularidad gracias al alza de precios del petróleo y a la necesidad de los países de procurarse una independencia energética a través de fuentes alternativas de energía de tipo renovable que fueran más viables.

### **2.3 Oferta de Biocombustibles en el Mundo**

Las fluctuaciones en el precio del petróleo, así como las políticas implementadas en los países que adquirieron diversos compromisos en el Protocolo de Kioto, son algunos de los factores que han impulsado el crecimiento de la producción de biocombustibles en el mundo.

Los países que han incursionado en la producción de Biocombustibles, se encuentran principalmente en el continente Americano y en Europa. Es así como más del 95% del Etanol producido en el mundo es cubierto por América, mientras que Europa le ha apostado en mayor medida a la producción de Biodiesel.

De acuerdo con el Departamento de Biocarburantes del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), durante la última década, la producción de Biodiesel a nivel mundial se ha multiplicado por 10, alcanzando una cantidad de 15.000 millones de litros en el 2009. De igual forma, el Etanol también ha presentado un aumento significativo en su producción, pasando de 20.000 millones a 90.000 millones de litros al año. [19]

La mayor porción de éste crecimiento se está generando principalmente en Alemania, Brasil y Estados Unidos, países que reúnen más de la mitad de la producción de Biodiesel y más de las tres cuartas partes de la producción de Etanol, a nivel mundial. Según los expertos, se prevé que el sector de los biocombustibles continuará en expansión, de un lado, se estima que el mercado del Etanol se duplique, impulsado principalmente por el auge de los biocombustibles en Estados Unidos, mientras que a un ritmo más mesurado, el mercado del Biodiesel continuará creciendo de forma considerable.

Conforme un estudio realizado por el **Global Biofuels Center**, en el año 2010 Estados Unidos ocupó el primer lugar en la clasificación mundial de capacidad de producción de Etanol y Biodiesel.

Etanol			Biodiésel		
	País	Millones de litros		País	Millones de litros
1	Estados Unidos	51.415,97	1	Estados Unidos	5.912,17
2	Brasil	26.887,52	2	Alemania	5.047,81
3	China	2.699,48	3	España	5.023,19
4	Francia	1.821,03	4	Indonesia	4.262,31
5	Canadá	1.494,50	5	Brasil	4.160,28
6	India	1.420,92	6	Malasia	4.091,18
7	Polonia	1.079	7	China	3.906,09
8	Alemania	916,97	8	Argentina	3.636,28
9	Tailandia	868,50	9	Francia	2.926,11
10	Jamaica	832,70	10	Tailandia	2.771
11	Trinidad y Tobago	757	11	Italia	2.749,99
12	Indonesia	683,38	12	India	1.715,64
13	España	546	13	Polonia	1.505,05
14	Austria	485	14	Países Bajos	1.124,09
15	Bélgica	485	15	Singapur	988,76
16	Países Bajos	480	16	Austria	982,96
17	Reino Unido	470	17	Reino Unido	970
18	Islas Vírgenes	387,50	18	Bélgica	886,37
19	Colombia	352	19	Grecia	850,26
20	Vietnam	318,11	20	Australia	797,81
21	Australia	292,70	21	Corea del Sur	762,91
22	República Checa	280	22	Portugal	590,92
23	El Salvador	247,10	23	Colombia	584,82
24	Paraguay	237,25	24	Filipinas	478,23
25	Argentina	237,20	25	República Checa	459,77
	<b>Total</b>	<b>95.694,83</b>		<b>Total</b>	<b>57.184</b>

**Tabla1. Clasificación de Países líderes en Capacidad de Producción de Etanol y Biodiesel**  
**Fuente: Torres y Carrera Consultores de Comunicación “Informe biocombustibles” 2010. p5.**

De acuerdo a éste ranking, se puede observar que los 5 países que lideran en capacidad de producción de Biodiesel son Estados Unidos, Alemania, España, Indonesia y Brasil mientras que la mayor capacidad de producción de Etanol la ostentan Estados Unidos, Brasil, China, Francia y Canadá.

Estados Unidos ha impulsado el avance tecnológico para la producción del Etanol proveniente del maíz. Las dos líneas más empleadas son la obtención del Etanol a través de la molienda seca del maíz y por medio de la molienda húmeda. Ésta última, a pesar de haber sido la primera técnica en desarrollarse, es actualmente la menos usada por su baja productividad. Por el contrario, la molienda seca representó en el 2008 el 80% de las plantas productoras de Etanol en el país. No obstante, durante la última década a partir de la ley de investigación y desarrollo de la biomasa, se han desarrollado nuevas tecnologías para la generación de biocombustibles más eficientes, por medio del uso de nuevas materias primas, como lo es el caso de los Biocombustibles de segunda generación. [20]

En el año 2010, el Presidente Obama creó el grupo de trabajo Interagencias para los Biocombustibles, el cual se encuentra trabajando en tres grandes campos: Desarrollo de materia prima, avance tecnológico y establecimiento de mercado. [21]

Por su parte, el Departamento de Agricultura (USDA) destinó cerca de 2.600 millones de dólares durante los años 2011 y 2012, para el desarrollo del Programa de Asistencia para la Cosecha de Biomasa. Este presupuesto fue aprobado en el 2010 con el fin de impulsar la siembra de nuevos acres de biomasa para la producción de energías renovables y biocombustibles. Dicho programa genera pagos del USDA a los agricultores de Biomasa renovables hasta por un 50% del costo total de la materia prima puesta en planta, incluyendo además todas las actividades agrícolas, así como la cosecha y el transporte. A través de éste programa se procura reducir el riesgo que

supone para el agricultor, el cambio de cultivos tradicionales a aquellos orientados a la producción de energía. [22]

Durante los últimos dos decenios, Estados Unidos ha producido Etanol de maíz a grandes escalas, ha incrementado su capacidad instalada hasta llegar a ser el principal productor de éste biocombustible a nivel mundial. Cuenta con una extendida red de plantas de producción de Etanol que se ubican en los estados del Norte del país y la cual ha ido expandiéndose en paralelo con los cultivos de maíz, para los cuales se dedica actualmente para la producción de Etanol el 20% del total de su cosecha. [23]

El gobierno de Estados Unidos, a través del Acto de Política Energética (EPA) del año 2005 creó la normativa del uso del Etanol en la gasolina en todos los Estados Unidos continentales, éstos objetivos hicieron posible que la industria del etanol a partir del maíz creciera de unos cuantos miles de millones de galones a más de 10.000 millones en menos de un decenio.

La EPA es responsable de desarrollar e implementar regulaciones para asegurar que el combustible de transporte vendido en los Estados Unidos contiene un volumen mínimo de combustible renovable. El RFS (Renewable Fuel Standard) es un programa de regulaciones que fue desarrollado en colaboración con las refinerías, los productores de combustibles renovables, y muchas otras partes interesadas.

El programa de RFS fue creado bajo la Ley de Política Energética (EPAct) de 2005, y estableció el primer mandato de volumen de combustible renovable en los Estados Unidos. Según lo dispuesto en EPAct, el programa original de RFS (RFS1) estableció como meta para el 2012, una mezcla en la gasolina de 7.5 billones de galones de combustible renovable.

Posteriormente surge el RFS2, que sienta las bases para lograr reducciones significativas de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de



combustibles renovables, para reducir las importaciones de petróleo, y fomentar el desarrollo y la expansión del sector de combustibles renovables en Estados Unidos. El RFS2 entró en vigencia en julio del 2010 y contempla un incremento gradual en el consumo del etanol de 10 mil a 36 mil millones de galones de etanol en el año 2022. De igual forma, incluye una segmentación en el mercado entre diversos tipos de etanol, según las materias primas que los originen, incluye además el objetivo de reducción de gases de efecto invernadero y regulación en el proceso de producción, limitando el volumen de etanol a base de maíz a 15.000 millones de galones a partir del 20125 y aumentando el volumen establecido para el Etanol de tipo avanzado (Etanol producido con materias primas diferentes al maíz) hasta los 21 mil millones de galones en el 2022. Esto se refleja en un crecimiento compuesto del 30% al año, durante el lapso de 2010 al 2022. [24]

Brasil, por su parte, a través del Programa Nacional hizo importantes avances en materia de biocombustibles, creando un fuerte mercado interno y estableciendo alianzas estratégicas entre el gobierno y las compañías ensambladoras de automóviles para a producción de vehículos tipo Flex-Fuel, los cuales permiten usar mezcla de Etanol en la gasolina, con diferentes relaciones porcentuales. Este país, al llevar la vanguardia en la producción y uso masivo del Etanol como combustible, se vio obligado a proveerse de una vasta infraestructura para producción y transformación de los insumos, así como su aprovechamiento en el sector transporte.

Actualmente existen alrededor de 355 ingenios azucareros que destilan el alcohol para utilizarlo como biocombustible, además cuenta con 46 plantas productoras de Biodiesel y 4 refinerías que usan el proceso HBIO (Tecnología para convertir aceites vegetales en Diesel). Para el transporte del etanol desde los centros de producción, hacia el Océano Atlántico, el país cuenta con 800Km de Alcohol-Ducto y han en marcha otros proyectos del gobierno que buscan expandir éstos ductos hacia otros lugares del mundo. [25]

Brasil ocupa el segundo lugar en producción de Etanol en el mundo. Es así como en el 2007, produjo un total de 21.300 millones de litros de Etanol, de los cuales exportó 3.532 millones a Europa, Estados Unidos, Trinidad y Tobago, El Salvador y Costa Rica y en el 2008, esta producción incrementó a 24.500 millones de litros de Etanol. La compañía Petrobras, es el comercializador de Etanol E25 (Porcentaje de mezcla en relación 25%75) y Biodiesel en Brasil, ya que solo produce combustibles fósiles que mezcla posteriormente para su mercado interno.

Por su parte, Europa cuenta con alrededor de 245 plantas de producción de Biodiesel, y su capacidad de producción ha aumentado en un 33% desde el 2009 de forma más rápida que su consumo. Según datos del European Biodiesel Board (EBB) la organización que agrupa a los productores europeos de Biodiesel, en el año 2010 la capacidad de producción ascendió a 21.904.000 toneladas anuales.

De otro lado, China le ha apostado a la producción de Etanol, lo que lo ha situado en el principal productor de Asia, con un total de 1.840 millones de litros producidos en el 2007. A nivel mundial ocupa el tercer puesto en producción de éste biocombustible, la cual un 80% proviene del maíz y el restante 20% de otras fuentes como el trigo, el sorgo y la patata dulce. [26]

Alemania, ocupa el segundo lugar en producción de Biodiesel en el mundo. Todo el Biodiesel producido en el país es para su consumo interno, ostentando cifras de producción como las del 2010, con un total de 4.9 millones de toneladas. La ADM es la empresa más representativa en éste país para la producción de Biodiesel y es la que cubre la mayoría de su producción total.

De otro lado, también con participación importante en la producción mundial de Biodiesel, tenemos a España con una producción de 894.000 toneladas en el 2007, las cuales provienen principalmente de aceites de origen vegetal.

Cabe destacar también el caso de Indonesia, país que ha sido petrolero por tradición, haciendo incluso parte de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), pero que debido al agotamiento de sus reservas y la consecuente caída de producción de crudo, fue expulsado de la Organización en el 2008. A raíz de ésta situación, el gobierno de Indonesia emitió un conjunto de normativas en el año 2006, con el fin de crear un mercado de Biocombustibles de tal forma que pueda incorporarlos en un 5% a la oferta energética interna para el año 2025. [27]

De acuerdo a la anterior información, se puede observar una relación entre la producción y consumo de biocombustibles, donde por lo general, los principales consumidores son también los mayores productores de ésta alternativa energética. La mayoría de la producción de biocombustibles está destinada al consumo interno de los países.

La suma de la volatilidad en los precios de la energía y las políticas destinadas a promover la seguridad energética y el uso de combustibles de fuentes renovables, ha estimulado el uso de materias primas agrícolas en la producción de biocombustibles. El pequeño pero creciente uso de biocombustibles en el sector transporte y el incremento de la cantidad de productos agrícolas dedicados a la producción de energía, ha fortalecido de la relación entre los mercados de productos básicos agrícolas y energéticos. Las políticas ambiciosas observadas en la mayoría de países productores de Biocombustibles ponen en evidencia una tendencia a futuro en el incremento de su producción y uso.

#### **2.4 Aspectos ambientales**

Actualmente, es irrefutable la creciente preocupación social por los problemas ocasionados al ambiente como consecuencia del desarrollo económico. Por lo tanto,

aquellas tareas relacionadas con el aprovechamiento energético de las materias primas, su transformación y consumo final, representan el primer factor de impacto ambiental a nivel mundial.

La humanidad tiene el reto de sostener los niveles de emisiones contaminantes dentro de unos rangos aceptables y de igual forma, debe procurar el establecimiento de un sistema energético que haga posible el cubrimiento de las necesidades energéticas de toda el planeta, procurando una ostensible mejora en la calidad de vida para toda la población.

La suma de éstos elementos ha posibilitado que en el marco energético actual, adquiera relevancia la sostenibilidad del medio ambiente, hasta el punto que se convierta en un factor determinante en la planeación energética de la mayoría de los países.

El cambio climático y el desgaste de la capa de ozono han adquirido mayor importancia a nivel mundial en la última década. El CO<sub>2</sub>, llamado Anhídrido Carbónico, es catalogado como el causante número uno del cambio climático, por su relación con el efecto invernadero. Es así como en el año 1998, se estimó que los humanos generábamos un aporte anual a la atmósfera de 27,5 gt de CO<sub>2</sub>, de las cuales la mayoría provenían de la combustión de fuentes de energía de origen fósil. Mientras que una parte de ésta emisiones son absorbidas y neutralizadas por los vegetales y océanos, el resto contribuye al calentamiento progresivo de la atmósfera. [28]

El Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), sostiene que desde el año 1900 se precipita el calentamiento de la atmósfera. Las cifras expuestas, indican que el planeta ha aumentado su temperatura en un promedio de 0,3 a 0,6°C. Este calentamiento ha provocado que el espesor medio de los bancos de hielo se haya reducido un 40% en medio siglo, con la subsecuente elevación del nivel de los océanos de 10 a 25 cm aproximadamente.

En los procesos de transformación, así como en el consumo de energía, se exponen grandes cantidades de óxidos de Azufre y de Nitrógeno, principales causantes de la lluvia ácida. Estos compuestos reaccionan en la atmósfera con el oxígeno y el agua y con la intervención de la luz solar formando ácido sulfúrico y ácido nítrico. Las precipitaciones de estos ácidos están provocando la degradación de enormes masas boscosas a través de la degradación de las plantas.

Las evaporaciones y combustiones incompletas de hidrocarburos provenientes de las refinerías, las instalaciones de combustión fijas y de los vehículos, ocasionan impactos asociados a la emisión de sustancias carcinógenas o al fenómeno llamado niebla de verano (smog fotoquímico).

Frente a ésta situación, y con base al Informe de la Comisión Brundlandt (1987), se celebra por primera vez la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992, donde nace la Convención Marco de Naciones Unidas sobre cambio Climático, espacio de análisis a escala global del calentamiento terrestre. Posteriormente, en 1997 se aprueba el Protocolo de Kioto, a través del cuál, 38 países industrializados se comprometen a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero en diferentes proporciones.

A continuación, en noviembre de 1998, en la IV Conferencia de las Partes del Convenio de Cambio Climático o Cumbre de Buenos Aires, se establece un Plan de Acción que incorpora Mecanismos para Reducir la Contaminación o Mecanismos para un Desarrollo Limpio, donde se fijan las cantidades de emisión que un país puede comprar a otros para cumplir la cuota asignada en Kioto. Igualmente se evalúan los aspectos concernientes al cumplimiento del Protocolo y se suscita la transferencia de tecnologías a países en desarrollo. Posteriormente, en la VI Conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en noviembre de 2000, en la Haya, se continuó estableciendo el marco para la puesta en práctica del Plan de Acción de Buenos Aires.

La disminución de la intensidad energética y por tanto un aumento de la eficiencia en los próximos años es un factor clave para poder atenuar el impacto ambiental y para que sea viable un crecimiento sostenible. Las energías renovables deben disponer de un desarrollo suficiente para tomar el relevo de algunas de las tecnologías actuales.

Cualquier tipo de cambio climático además implica cambios en otras variables. La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios sea mediante el uso de modelos computacionales que intentan simular la física de la atmósfera y del océano y que tienen una precisión limitada debido al desconocimiento del funcionamiento de la atmósfera.

La teoría antropogénica predice que el calentamiento global continuará si lo hacen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El cuerpo de la ONU encargado del análisis de los datos científicos es el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés de Inter- Governmental Panel on Climate Change). Según el IPCC, La mayoría de los aumentos observados en las temperaturas medias globales a partir de la segunda mitad del siglo XX, son debidos muy probablemente al aumento observado en las concentraciones de GEI antropogénicas. Sin embargo, existen algunas divergencias al respecto de que el dióxido de carbono sea el gas de efecto invernadero que más influye en el Calentamiento Global de origen antropogénico.

El Protocolo de Kyoto, acuerdo promovido por el IPCC, promueve una reducción de emisiones contaminantes (principalmente CO<sub>2</sub>). El protocolo ha sido tachado en ciertas ocasiones de injusto, ya que el incremento de las emisiones tradicionalmente está asociado al desarrollo económico, con lo que las naciones a las que más afectaría el cumplimiento de este protocolo podrían ser aquellas zonas menos desarrolladas.

## 2.5 Energías Alternativas

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

De ésta forma, una fuente de energía alternativa es aquella que puede substituir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o esencialmente por su posibilidad de renovación.

El actual modelo económico, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige asimismo una demanda creciente de energía. Debido a que las fuentes de energía nuclear y fósil son de carácter finito, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser suplida y el sistema llegue al colapso. No obstante, el descubrimiento y desarrollo de nuevos métodos para obtener dicha energía, permitiría salvar la situación. Éste es el caso de las energías alternativas. Existen diversos tipos de energías alternativas, pero hay unas más representativas y cuyo uso se está expandiendo actualmente en el mundo:

1. **Energía Eólica:** Es la energía cinética o de movimiento que contiene el viento, y que se capta por medio de aerogeneradores o molinos de viento.
2. **Energía Solar:** Es aquella recolectada de forma directa en forma de calor a alta temperatura en centrales solares de distintas tipologías, o a baja temperatura mediante paneles térmicos domésticos, o bien en forma de electricidad mediante el efecto fotoeléctrico mediante paneles foto voltaicos.
3. **Biomasa:** Se obtiene por descomposición de residuos orgánicos o bien por su quema directa como combustible.

4. **Geotérmica:** Se genera haciendo uso del agua que surge bajo presión desde el subsuelo.
5. **Hidráulica:** Se deriva de la evaporación del agua.
6. **Mareomotriz:** Se deriva de las corrientes marítimas.

La disyuntiva que hay frente al uso de energías alternativas o convencionales, es más que una simple clasificación de las fuentes de energía, por el contrario, representa un cambio requerido en el planeta. Cabe señalar, que las energías alternativas, aun siendo de tipo renovable, también son finitas, y como cualquier otro recurso natural tendrán un límite máximo de explotación, es por esto que aunque podamos realizar la transición a estas nuevas energías de forma sutil y progresiva, éste tipo de energías tampoco soporta indefinidamente un modelo económico basado en el crecimiento perpetuo.

### **2.5.1 El Etanol como Energía**

El Etanol es un compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que puede utilizarse como combustible, solo, o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y su uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo.

Este producto puede obtenerse de dos formas. La mayor parte de la producción mundial se consigue del procesamiento de materia biológica, en particular ciertas plantas con azúcares. El Etanol así producido se conoce como Bioetanol. Por otra parte, también puede obtenerse etanol mediante la modificación química del etileno, por hidratación.

### **Bioetanol**



El etanol es un combustible que puede producirse a partir de un gran número de plantas, con una variación, según el producto agrícola, del rendimiento entre el combustible consumido y el generado en dicho proceso.

El Bioetanol tiene las mismas características y composición química que el etanol ya que se trata del mismo compuesto. La diferencia radica en su proceso de producción. El Bioetanol ha de ser obtenido desde biomasa, no pudiendo obtenerse del petróleo. Todos los licores alcohólicos que proceden de la fermentación del azúcar de alguna planta se pueden considerar como Bioetanol.

El etanol se obtiene fácilmente del azúcar o del almidón en cosechas de maíz y caña de azúcar, entre otros. Sin embargo, los actuales métodos de producción utilizan una cantidad significativa de energía en comparación con la energía obtenida del combustible producido. Por esta razón, no es posible sustituir enteramente el consumo actual de combustibles fósiles por Bioetanol.

Hoy en día se utilizan tres tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico (Bioetanol):

1. Sustancias con alto contenido de sacarosa : Caña de azúcar , remolacha, melazas, sorgo dulce.
2. Sustancias con alto contenido de almidón : Maíz, patata , yuca .
3. Sustancias con alto contenido de celulosa : Madera, residuos agrícolas.

## **2.5.2 Proceso De Extracción del Etanol**

### **Proceso de extracción del Etanol en Colombia**

#### **a. Fermentación**

Las materias primas para la producción de alcohol son: jugo clarificado, meladura y mieles B, provenientes de la fábrica de azúcar. La fermentación para producir etanol, es un proceso microbiológico en el cual los azúcares contenidos en las materias primas, son convertidos por la levadura en etanol y gas carbónico.

#### **b. Separación de Levadura**

El mosto fermentado o vino que sale del fermentador final, contiene alcohol diluido en agua y levadura; éste es llevado a un tanque sedimentador donde la levadura se decanta, sale por el fondo y se envía al tanque de activación de levadura, mientras el líquido conocido como vino es enviado al proceso de destilación.

#### **c. Activación de Levadura**

La levadura recuperada en el separador es sometida a un proceso de activación que consiste en esterilizarla, darle unas condiciones de aireación y suministrarle nutrientes para fortalecerla y utilizarla de nuevo en el proceso de fermentación.

#### **d. Destilación**

El vino contiene alcohol diluido en agua y otras impurezas que deben ser separadas del alcohol por medio del proceso de destilación.

Este proceso aprovecha que el alcohol hierve a una temperatura más baja que el agua, lo cual permite separar primero los vapores de alcohol que salen por la parte superior de la columna mostera, mientras que por el fondo sale vinaza, residuo compuesto por agua con impurezas.

Los vapores obtenidos en la primera separación contienen aproximadamente 45% de alcohol y son enviados a la columna rectificadora, de la cual, por la parte superior, se obtiene alcohol rectificado que contiene 95% de etanol. Por el fondo, sale agua con algunas trazas de alcohol, residuo conocido como flemaza.

#### **e. Concentración de la Vinaza**

Una parte de la vinaza que sale de la columna mostera es reutilizada en el proceso de fermentación y el resto es procesada en los evaporadores flubex, en los que se elimina agua en forma de vapor para concentrar la vinaza desde 11° hasta 35° Brix, con el fin de reducir la cantidad y facilitar su posterior tratamiento.

#### **f. Deshidratación de alcohol**

El alcohol purificado en la destilación contiene 95% v/v de etanol y 4% v/v de agua. Para que este alcohol pueda ser usado como combustible, es necesario retirarle más agua; esto se hace utilizando un tamiz molecular, que por medio de una resina sintética retiene el agua contenida en el alcohol rectificado, para obtener como producto alcohol deshidratado con una concentración de 99.5% de etanol y una cantidad mínima de agua, cumpliendo con las especificaciones establecidas para su uso como alcohol grado combustible o alcohol carburante.

#### **g. Almacenamiento y Despacho**

Finalmente el producto es enviado a la zona de almacenamiento, que tiene una capacidad de 6 millones de litros y permite almacenar 20 días de producción para suplir los requerimientos del mercado.

### **2.6 Biocombustibles en Colombia**

Aunque la historia de los biocombustibles en el mundo data de comienzos del siglo 20, en Colombia tan solo en los años 90 comienza a impulsarse su uso.

En el año 1942, a través del representante a la cámara Luis B. Ortiz, se presenta un proyecto de ley que establece el uso obligatorio de alcoholes de caña de azúcar y yuca, mezclados en la gasolina, pero éste proyecto se detiene por el contrapeso realizado por las empresas petroleras que se encontraban en el país entonces. [29]

Nuevamente en 1979, fue presentado un proyecto de Ley por parte del senador Héctor Echeverry con el fin de excluir los alcoholes industriales y energéticos del monopolio de los departamentos, pero igualmente no tuvo acogida en el congreso. Posteriormente, en el año 1984, hubo un acercamiento por parte de Ecopetrol hacia el sector azucarero, para buscar que destinaran sus excedentes a la producción de Etanol, pero el tema perdió fuerza a raíz del descubrimiento de nuevos pozos petroleros que desviaron la atención.

En la siguiente década, se retoma el tema de energías renovables, por un grupo de empresarios colombianos liderados por el senador Amylkar Acosta, quien plantea en el Congreso de la República un proyecto de ley que buscaba hacer obligatoria la mezcla de Etanol en la gasolina, propuesta que finalmente fue acogida por el gobierno. Esto en vista de que el país seguía importando el crudo, pese a sus reservas y producción interna.

A diferencia de otros países productores y consumidores de biocombustibles, donde la iniciativa de incursionar en éste tipo de mercados ha surgido del propio gobierno, en Colombia la propuesta nació del particular que volcaron la atención del gobierno hacia la importancia de éstas alternativas de energéticas y subsecuentemente a la creación de un marco legal que regule su producción y consumo.

### **3.7 Marco legal del Etanol en Colombia**

Dentro del marco legal de biocombustibles en Colombia, hay tres leyes principales que sobresalen: La Ley 693 del 2001, la Ley 788 del 2002 y la Ley 939 del 2004. Dichas normas, establecieron la obligatoriedad de la mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles, generaron exenciones de tipo tributario tanto para productores como para consumidores. Esto contribuyó a la oferta de biocombustibles para los

automotores. Adicionalmente, existen otras leyes secundarias que se encargan de la regulación de aspectos como la producción y consumo de biocombustibles en el país.

Amylkar Acosta, encabezando la iniciativa del grupo de empresarios colombianos para la promoción del consumo de biocombustibles en Colombia, presentó la propuesta en el congreso, la cual fue acogida por la mayoría de senadores generándose entonces la expedición de la Ley 693 del 2001, más conocida como la Ley del Etanol. Dicha Ley exigía que “las gasolinas que se utilicen en el país en los centros urbanos de más de 500.000 habitantes tendrán que contener componentes oxigenados tales como alcoholes carburantes” [30]

Esta medida se tomó por el contexto internacional de la época, que prohibía el uso de MTB como carburante y donde comenzaban a plantearse los objetivos del milenio en relación al desarrollo sostenible y a la reducción de la contaminación del ambiente por causa de los gases de efecto invernadero. Es así como dicha ley promovió la opción de la industria de los biocombustibles sustentada en tres objetivos fundamentales: Mejorar el medio ambiente, general empleo rural a través del desarrollo de las regiones y reducir la dependencia del petróleo. Para la consecución de éstos objetivos se estableció que la mezcla de etanol con gasolina fuera de carácter obligatorio y se fijó un plazo de 5 años para la implementación de la norma.

En el 2002, con el fin de darle continuidad a la política de gobierno del uso de Biocombustibles, se emite la Ley 788 de 2002, reforma tributaria que declara exento del impuesto sobre las ventas (IVA) al Alcohol carburante, con destino a la mezcla con gasolina para los vehículos automotores y se exonera del pago del impuesto global y de la sobretasa al porcentaje de alcohol carburante que se mezcle con la gasolina, lo cual procuró mayores facilidades e incentivos gubernamentales para que el porcentaje de etanol en la gasolina fuera aumentando con el tiempo. [31]

Posteriormente, en el 2003 se genera la resolución 0447, la cual modifica la resolución 898, encargada de regular los criterios ambientales sobre calidad de los combustibles sólidos o líquidos usados para fines comerciales, industriales y en motores de combustión; la nueva resolución trata sobre la eficiencia que se busca en los motores de los autos usados en Colombia, con el fin de reducir los contaminantes. Como los estándares de carácter técnico y ambiental de los combustibles, deben contribuir con la reducción de emisiones tóxicas, la compañía Ecopetrol inició estudios sobre la eficiencia de la gasolina oxigenada producida en Colombia para determinar así la mezcla más adecuada. Como resultado de éstos estudios se obtuvo que el porcentaje de etanol óptimo para la mezcla era del 10%, el cual cumplía con los estándares internacionales y debía usarse en todo el territorio Nacional. [32]

Luego de esto, por iniciativa del gobierno, en diciembre del 2004 se expide la Ley 939 más conocida como Ley del Biodiesel, la cual contemplaba básicamente los mismos objetivos que la Ley 693 del 2001 pero con respecto al Biodiesel. Dentro de ésta norma se consideraban las materias primas para elaborar el Biodiesel dentro de las cuales se encuentra el aceite de palma, el caucho y el cacao, los cuales gozarán de exenciones para su producción.

En los años posteriores fueron emitidas varias resoluciones referentes a los biocombustibles, donde la de mayor relevancia fue la 181078 que regula la forma de manejar la estructura de precios de la gasolina gasificada en sus fases de producción, distribución y venta de alcohol carburante, considerando el ingreso del productor, el precio máximo al distribuidor minorista y el precio máximo al distribuidor mayorista. [33]

Tanto el Etanol como el Biodiesel en Colombia, tienen precios regulados por el gobierno Nacional. Es así como el primer día de cada mes el Ministerio de Minas y

Energía fija el precio y el porcentaje de mezcla de los biocombustibles, valores que rigen durante todo el mes, hasta su siguiente actualización.

Se han determinado 3 fórmulas diferentes para fijar el precio de los biocombustibles a Nivel Nacional, a saber:

1. Un precio base, el cual se ajusta anualmente con el índice de precios al mayorista y la TRM que asegura al sector industrial una tasa de retorno mínima.
2. Un precio que tiene en cuenta el valor de la materia prima más un costo fijo adicional por su transformación industrial.
3. Un precio que depende del valor del hidrocarburo que es reemplazado por el biocombustible, más el costo de transformación.

El precio resultante de las anteriores fórmulas determina cuánto se le reconoce a los productores, ya que se selecciona el precio más alto de todos, y del lado de los consumidores de combustibles a quienes se les carga el pago de impuestos del 39% y 23% por la gasolina y ACPM respectivamente, se les exonera del pago de impuestos correspondiente a la porción de etanol mezclado con el combustible que esté consumiendo.

En el año 2005, se generó el decreto 3862 que modifica la Ley 693 del 2001, que establece que para efectos fiscales la mezcla de Etanol/Gasolina no es considerada producto de un proceso industrial o de producción, lo cual redundará en mayores beneficios para productores y consumidores.

Con la creación de la Ley 1083 del 2006, se establece un marco normativo para la generación de desarrollo sostenible en el país. Allí se establecen algunas normativas para la planeación urbana sostenible, donde se da relevancia a los medios de transporte alternativos. Surgen a partir de allí compromisos de parte de los Ministerios

de Minas y Energía, de Protección Social y Medio Ambiente y el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, para determinar cuáles son los combustibles más aptos para la salud del ser humano y el medio ambiente. [34]

La implementación de un proyecto de biocombustibles que sea sostenible, es vital para el gobierno Colombiano, por lo tanto se tiene como normativa que no sean utilizadas para la producción de biocombustibles, las selvas o áreas destinadas a cultivos de productos alimenticios y se recomienda que en su lugar, se aproveche para el cultivo de materia prima para biocombustibles, aquellas tierras de la ganadería que son subutilizadas o suelos pobres en nutrientes.

Dentro de las zonas destinadas para la producción de biocombustibles, se encuentran las zonas francas de único usuario, que fueron creadas a través del decreto 383 del 2007. En éstas tierras se llevan a cabo aquellos proyectos agroindustriales de biocombustibles cuya inversión sea de 16 millones en un lapso que no supere los 3 años o que en su defecto, generen un total de 500 empleos en la cadena agroindustrial. Esta clasificación de zona franca, hace que los equipos, insumos y elementos importados, estén exentos de arancel y vean reducido su impuesto de renta de un 33% a un 15%.

Por su parte, el Ministerio de Minas y Energía en el 2007 dio a conocer el decreto 2629, el cual dicta la normativa para promover el uso de biocombustibles en Colombia, a partir de medidas aplicables a los vehículos que hagan uso de la gasolina para funcionar. Con dicha ley se procura que hayan más artefactos con funcionamiento tipo Flex-Fuel de tal forma que puedan soportar una mezcla de Biocombustible con la gasolina en relación 80%/20%. Para el logro de estas metas, se establecieron plazos para el acondicionamiento del parque automotor colombiano, de la siguiente manera: Para inicios del 2012 los motores nuevos que se vendan en Colombia deben tener la capacidad de operar con mezclas de 80% de biocombustible y 20% combustibles de origen fósil. [35]



El Departamento de Planeación Nacional, dentro de la normativa para la regulación de biocombustibles, realizó un documento en conjunto con el Consejo de Política Económica y Social (CONPES 3510 del 2008), en el cual se explica los lineamientos de la política para promover la producción del Biodiesel, buscando lograr un desarrollo competitivo del sector palmero colombiano. La normativa se enfocaba en el sector de la agricultura, la investigación, la infraestructura y el entorno, que inciden en la producción de biocombustibles, con el propósito de aprovechar las opciones de crecimiento económico que ofrece el sector y posicionar al país como un exportador de biocombustibles. [36]

Se plantea además el plan de acción para alcanzar las metas propuestas, donde lo más relevante fue la creación de la Comisión Intersectorial para el manejo de los Biocombustibles, la cual debe estar regulada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el Ministerio de Transporte, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo y por el Departamento de Planeación Nacional para el manejo de formulación y planeación de políticas públicas en materia de biocombustibles. [37]

De relevancia también en el marco legal colombiano para los biocombustibles, es el Plan de Desarrollo del 2010-2014, donde el gobierno colombiano resalta que se ha generado un marco político regulatorio que procura la generación de incentivos económicos que incentiven la participación del sector privado dentro de la cadena productiva de los biocombustibles. Dentro de éste plan, se tiene la expectativa de ampliación del sector agropecuario a través de la consolidación de sectores de gran importancia, como lo es el caso de los biocombustibles. Es por esta razón que se plantea la observación de los avances que van presentando a través del tiempo, los porcentajes de mezcla de biocombustibles en la gasolina, analizando su viabilidad y eficiencia, con el objetivo de lograr una coordinación entre instituciones para la reglamentación en aspectos técnicos y económicos de las estaciones de servicio, las plantas de abastecimiento y refinerías del país para el uso de la tecnología Flex-Fuel con

el propósito final de definir las condiciones de mercado que permitan la circulación de éste tipo de automotores en el país. [38]

Como la investigación es vital para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el amplio uso de biocombustibles en el país, dentro del Plan Nacional se incluye el objetivo de progresar en estudios que se precisen para acceder y posicionar en los mercados internacionales los combustibles de carácter renovable. Esto con el propósito de participar de forma activa en las iniciativas mundiales respecto al uso de energías renovables y estar a la par con los estándares de calidad de los biocombustibles.

A pesar de que el uso de combustibles de tipo renovable en el país fue una iniciativa del sector privado, a través del tiempo fue transformándose en una política de Estado, cuyo pilar es el desarrollo de las regiones a través de la extensión de la frontera agrícola hacia cultivos energéticos, el robustecimiento de la independencia energética al reducir la dependencia del petróleo, la generación de empleos y la disminución de emisiones contaminantes para contribuir al bienestar del medio ambiente. [39]

Con esas bases, el gobierno colombiano da por sentado que los biocombustibles contribuyen a la independencia energética de la nación y al saneamiento ambiental, como activador de la producción agropecuaria y del empleo, tanto en el sector rural como industrial.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### **Estudios sobre Biocombustibles en el Contexto Mundial**

El tema de los combustibles es relativamente nuevo. La mayoría de investigaciones que se han desarrollado al respecto, están enfocadas a aspectos técnicos y del proceso de extracción de los mismos.

Adicionalmente, se han hecho análisis (principalmente por parte de organizaciones de corte ambientalista) respecto a los posibles efectos contraproducentes de este nuevo mercado sobre el suministro de alimento para las personas y la dudosa contribución positiva al medio ambiente.

En este sentido, (Von Braun, 2008) presenta en su trabajo un recorrido por el panorama energético a nivel mundial, haciendo especial énfasis sobre el crecimiento acelerado de la demanda y los precios de la energía, lo que ha incentivado a los gobiernos a nivel mundial, a la búsqueda de otras alternativas de energización, como es el caso de los biocombustibles. Braun, realiza un análisis bajo la perspectiva de la soberanía alimentaria de los pueblos, presentando las posibles implicaciones que puede tener sobre la agricultura del mundo, la producción de biocombustible a partir de materia prima que ha sido destinada normalmente para la alimentación humana. Basado en estadísticas suministradas por la FAO, muestra cómo será en el futuro la demanda mundial de biocombustibles a partir de la dinámica de crecimiento que ha presentado en los últimos 6 años este mercado. Con base en esto, se estimó que para el mediano plazo, el promedio de los países tenderá a cumplir con la meta del 15% de mezcla de biocarburantes en la gasolina que se consuma. Teniendo en cuenta a todos los países con una población superior a los 5 millones de personas que en total fueron 102, se estimó el potencial de los mismos para la producción de biocombustibles, basados en tres parámetros: la disponibilidad de tierras, los recursos hídricos y el grado

de seguridad alimentaria de cada país. De todo lo anterior, se llegó a la conclusión de que solo 36 de los 102 países no se encuentran aptos para tal propósito. Según esto, se pondría en riesgo el suministro de alimentos para dichos países, si decidieran incursionar en este mercado. Se sugiere a partir de estos resultados, que se garantice primero un balance energético positivo, antes de incursionar en la producción de biocombustibles, así como también la implementación de políticas que mitiguen el impacto en diversas variables macroeconómicas y ambientales.

Si bien este estudio tiene en cuenta factores claves en el análisis de la temática, como lo es la demanda energética mundial y la disponibilidad de tierras para la producción de biocombustibles, carece de un enfoque metodológico y de rigurosidad científica, pues solo se apoya en datos estadísticos haciendo proyecciones de forma muy superficial. Además de esto, su alcance es difuso, tiene en cuenta datos generalizados de los países, sin tomar en consideración la diversidad de sus políticas internas, que influyen de forma determinante en la dinámica de la situación.

El estudio realizado por el IFPRI aborda el tema del futuro de los biocombustibles respecto de su oferta, demanda, y las tecnologías utilizadas para su producción. Se basan en el uso de tres escenarios alternativos: un escenario convencional, centrado en el rápido crecimiento mundial de la producción de biocombustibles bajo tecnologías de conversión convencional; un escenario de segunda generación, que considera una disminución en la demanda en los cultivos de alimentos debido al uso de tecnologías de segunda generación que utilizan como materia prima biomasa lignocelulósica (proveniente de residuos agrícolas); y un escenario de segunda generación plus, que adiciona mejoras respecto a la productividad de los cultivos, teniendo en cuenta las tecnologías de segunda generación, con el fin de reducir aún más los potenciales impactos adversos de la expansión de los biocombustibles. El modelo utilizado para este análisis es el Modelo Internacional de Análisis de Políticas Agrícolas de Productos

Básicos y Comercio (IMPACT), que ha sido utilizado por el International Food Policy Research Institute (IFPRI) para la proyección mundial de alimentos, su demanda y la seguridad alimentaria para 2020 y más allá. [40]

Los resultados arrojados por estos escenarios, muestran cómo se presentaría una gran desventaja si las innovaciones y las inversiones en tecnología respecto a la productividad de los cultivos son lentas, y si solo se utilizan tecnologías convencionales para la conversión de materias primas en biocombustibles, para hacer frente a la futura demanda de los mismos para la mezcla con combustibles fósiles. El panorama cambia considerablemente de forma positiva, cuando se considera el aumento de las inversiones en las tecnologías de conversión de la materia prima y la mejora en la productividad de los cultivos. Bajo el primer escenario, se obtuvo como resultado un exagerado aumento del precio en los mercados de granos básicos, esto debido en gran medida a que son mayores en volumen y escala geográfica. Esto sería un escenario positivo para los productores por sus altos ingresos, más no para los consumidores directos de los alimentos. Por el contrario, el segundo escenario, que simula el impacto de las tecnologías para biomasa lignocelulósica, muestra una considerable mitigación en el alza de los precios. El tercer escenario, muestra cómo las inversiones en la industria de biocombustibles y el sector, pueden combinarse para obtener resultados más satisfactorios, donde se pueda atenuar las consecuencias nocivas de los impactos en el mercado, especialmente sobre el consumidor.

Un punto a resaltar en el trabajo citado, es el uso de escenarios para evaluar la problemática de interés. Esto permite realizar un análisis de las diferentes situaciones que pueden presentarse dadas determinadas condiciones, lo cual es particularmente útil pues permite evaluar riesgos, sin incurrir en mayores costos. Sin embargo, no se expone de forma clara la forma en que implementan esta metodología ni los parámetros considerados en las simulaciones. Además, al considerar los escenarios de

forma global, se incurre en el error de generalizar situaciones, sin tener en cuenta que cada país posee condiciones diferentes tanto en sus políticas económicas internas, como en la disponibilidad de los recursos agrarios e hídricos que proveen la materia prima necesaria para la producción de biocombustibles.

### **Biocombustibles en el Contexto Colombiano**

En la última década, en Colombia ha venido tomando fuerza la investigación científica en el área de los biocombustibles. Son los principales ingenios azucareros del país quienes más han invertido en su estudio, pero desde la perspectiva de adecuación de infraestructura y el proceso químico de extracción del Etanol. También, se han realizado investigaciones al interior de la Universidad Nacional de Colombia, donde se indica que con el uso del biocombustible (mezcla Etanol/gasolina) el motor de los carros puede sufrir afecciones debido a un aumento en su temperatura y se afirma además, que esto conlleva a un incremento de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Estos resultados contrastan con los obtenidos por el *Instituto Colombiano de Petróleos* (ICP), que asegura que el uso de la mezcla Etanol/gasolina no aumenta la temperatura del motor de los vehículos, argumentando que esto solo depende de la sincronización de los mismos y a la vez, se indica que la variación en el consumo de combustible depende de diversos factores como lo son el estado mecánico del vehículo, su sincronización, las prácticas de conducción y las condiciones atmosféricas. Respecto a las emisiones de óxido de nitrógeno, concluyen que disminuiría la probabilidad de formación de éstos el uso de una mezcla de Etanol/gasolina en proporción del 10%/90% respectivamente, ya que contiene un 3,5% más de oxígeno que la gasolina sin mezclar. [41]

También se han realizado estudios en la Universidad Nacional acerca de la extracción del Etanol a partir de otras fuentes diferentes a la caña de azúcar, como lo son el almidón de yuca y la cáscara de banano. [42]

Además, con otras investigaciones, se ha buscado evaluar las materias primas y las tecnologías existentes para la producción de Etanol a partir de caña de azúcar, maíz y biomasa lignocelulósica, con el fin de seleccionar la más conveniente de acuerdo con indicadores tecnológicos y ambientales. [43]

De otro lado, un grupo de investigadores de la Universidad de Caldas y la Universidad Nacional de Manizales (Montoya R. et All) realizaron una evaluación económica de los procesos de obtención de etanol a partir del maíz y de la caña de azúcar en Colombia, con el objetivo de definir cuál de ellos presenta una mayor factibilidad dadas las condiciones de producción en el país. En el trabajo, concluyen que para las condiciones actuales del país el proceso con mayor factibilidad económica es aquel a partir de caña de azúcar. Se ratificó que dentro de los costos de producción, el mayor aporte es debido a la materia prima, al igual que el mayor consumo energético del proceso se da en la sección de separación y deshidratación de etanol. Éste análisis económico, se realizó a través de la simulación de los dos esquemas seleccionados en el software aspen plus con el fin de obtener la información mínima requerida para el dimensionamiento de los equipos y la determinación del consumo de fluidos de servicio. Así mismo, para el estudio hicieron uso de los costos de capital, los costos de operación y los indicadores de factibilidad para los dos procesos, los cuales se obtuvieron con ayuda del paquete Aspen Icarus Process Evaluator, dadas unas condiciones específicas para Colombia.

Este trabajo realiza un aporte importante, pues aborda el tema de los biocombustibles, desde otra perspectiva: la económica. Sin embargo, el alcance del análisis se limita a su

producción y no considera otros factores de tipo normativo que influyen significativamente sobre el retorno final hacia el productor.

Asimismo, autores como Ana María Flórez (2011), Sebastian Zapata (2011), Flórez y Ochoa (2008) efectuaron estudios enfocados a la cadena de suministro de biocombustibles (Biodiesel y Bioetanol) partiendo de un modelo de dinámica de sistemas, por medio del cual analizan su comportamiento a través de diversos escenarios y políticas.

Tomando en consideración las materias primas más usadas en Colombia para la producción de Biodiesel y Bioetanol así como las distintas regiones que comprenden los principales centros de producción y consumo, Ana María Flórez [44] propone un modelo regional de Dinámica de Sistemas que permite valorar la estructura y comportamiento de la cadena de suministro de biocombustibles en Colombia y analiza bajo diferentes escenarios las actuales políticas gubernamentales generadas con el fin de aumentar la producción para el cumplimiento de los porcentajes de mezcla fijados. En este sentido, se concluye que a pesar de que la producción actual de biocombustibles no satisface la demanda interna, la implementación de un plan de expansión que comprenda la inversión en nuevas plantas de producción, haría posible el cumplimiento de las metas establecidas e incluso permitiría contar con excedentes para exportación. Igualmente se pone de manifiesto que los incentivos del gobierno que pueden motivar de forma efectiva y determinante la inversión en el sector de los Biocombustibles son aquellos que comprenden la fijación de su precio y del porcentaje de mezcla establecido para los mismos. No obstante, a pesar de que la producción de biocombustibles en Colombia alcance niveles adecuados para satisfacer la demanda interna, debe tenerse en consideración la focalización de dicha producción en ciertas regiones lo que implica el transporte de los excedentes para lo cual debe contarse con



una infraestructura de transporte de biocombustibles que puede convertirse en una importante restricción al suministro de éstos en el país.

Este trabajo realiza un importante aporte al tema de los biocombustibles en Colombia ofreciendo un análisis sistémico enfocado al estudio de la cadena de suministro teniendo en cuenta factores como la centralización de la producción por regiones, los incentivos del gobierno y la satisfacción de la demanda de acuerdo a la expansión de la capacidad instalada. Sin embargo, hay aspectos importantes que se escapan de su alcance como lo es el caso de las exportaciones e importaciones, el transporte de materia prima y en especial el comportamiento del precio de las materias primas como efecto colateral de la dinámica del precio de los biocombustibles que se derivan de las mismas.

Por su parte, Sebastian Zapata [45] a través de un modelo de dinámica de sistemas analiza el comportamiento del mercado de la palma de aceite en Colombia teniendo en cuenta factores como la competencia por la materia prima que es destinada para alimentación y para la producción de biocombustibles, así como la proyección del aumento de la oferta de biodiesel como política a implementar por el gobierno en su proyección para el cumplimiento de los porcentajes de mezcla definidos como metas. Bajo las premisas de satisfacción en primera instancia de la demanda de palma de aceite para alimentos y la disponibilidad del total de la capacidad instalada para producción de Biodiesel, se obtuvieron resultados que apuntan a que con el establecimiento de porcentajes de mezcla de biodiesel de 10% y 20% la demanda de biodiesel puede ser cubierta paulatinamente hasta llegar a su completitud en un horizonte de tiempo de 10 años, alcanzando incluso una oferta sobrante que podría ser utilizada para la exportación. Este resultado fue similar en dos escenarios de crecimiento económico diferente: Medio y Alto. De lo cual se concluye que Colombia

cuenta con la suficiente disponibilidad de tierras para producir Biodiesel, sin ver afectada su seguridad alimentaria respecto a la materia prima.

Si bien éste estudio proporciona información relevante sobre la dinámica del mercado de biodiesel en Colombia, hay factores importantes que no son considerados en relación al precio de la materia prima y cómo se retroalimenta con el comportamiento del precio interno del Biodiesel, ya que éste último es tomado en el modelo como una variable exógena dependiente exclusivamente del precio internacional de la palma de aceite. De igual forma no se tuvo en cuenta la forma en que puede verse afectado el sector frente a un aumento en la inversión para plantas de producción de Biodiesel que permita mayores tasas de producción.

Franco, Florez y Ochoa [46] proponen un modelo de Dinámica de Sistemas de la cadena de suministro de biocombustibles en Colombia, que proporciona una valoración del impacto que tienen las políticas del gobierno sobre la oferta de biodiesel y etanol. Se muestra cómo el gobierno colombiano se ha enfocado en el incentivo de la inversión en plantas de refinación y disponibilidad de materias primas, ya que éstas han sido las principales limitaciones a la producción de Biocombustibles. Éste esquema de incentivos aplica beneficios por igual a las plantas de refinación de Etanol y Biodiesel, sin considerar las diferencias que presentan en cuanto a su materia prima, lo cual aporta un desequilibrio en las capacidades de producción de cada biocombustible y desmejora su oferta.

Los estudios realizados hasta el momento en el tema de los biocombustibles, no abordan el tema desde una perspectiva global, donde se analicen las interacciones que pueden presentarse y sus consecuentes efectos a mediano y largo plazo, por ejemplo sobre la economía, más específicamente sobre el mercado de la materia prima de la que se extraen estos combustibles (la caña de azúcar para el caso colombiano).

A pesar de la creciente actividad investigativa en el tema de los biocombustibles en Colombia reflejada en los trabajos anteriormente citados, aún no se han realizado estudios que aborden el tema con un enfoque más sistémico, donde se analicen las interacciones que pueden presentarse y sus consecuentes efectos a mediano y largo plazo sobre la economía, más específicamente sobre el mercado de los derivados de la caña de azúcar. Es en este sentido, donde radica la contribución del presente trabajo a la generación de un mayor conocimiento en el tema del biocombustible generado a partir Etanol de la caña de azúcar en Colombia.

Cuando se habla de la materia prima para producir biocombustibles, se hace referencia a cultivos que en la mayoría de los casos, son plantados con fines alimentarios. En este sentido, es de gran importancia el cuestionamiento sobre los posibles efectos de la integración de este nuevo mercado, sobre la soberanía alimentaria de los pueblos, las pequeñas agriculturas familiares y en la biodiversidad. Lo anterior, teniendo en cuenta además la escala del fenómeno, ya que sus efectos a nivel local están en estrecha relación con su dinámica a nivel global.

Se sabe que la mayor causa del efecto invernadero es la producción de CO<sub>2</sub> generado por la combustión de los automotores en todo el mundo. Es importante entonces explorar también el efecto ambiental a un mediano y largo plazo para evaluar si los argumentos referentes al medio ambiente de la propuesta permanecen.

Una de las principales expectativas frente al este mercado emergente, es su esperada contribución a la generación de nuevos empleos, su conversión en una importante fuente de divisas para el país a mediano plazo y el impacto social positivo que se espera que tenga en lo referente a la reducción de costos por galón de Bioetanol, en comparación con los hidrocarburos. Por lo anterior, existe la necesidad de examinar nuevas estrategias que posibiliten el sostenimiento, rentabilidad y beneficio. Queda abierto un amplio horizonte para investigar sobre el tema.

## 5. DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En Colombia, el tema de los biocombustibles se encuentra en discusión desde hace unos años atrás, por parte de algunos políticos y empresarios que desde entonces han especulado sobre la viabilidad económica de este mercado para el país.

La expedición de la ley 693 fue el factor detonante para un cambio inevitable en el país. La introducción al mercado de un producto cuya materia prima tradicionalmente se ha utilizado para el consumo humano, genera diversas opiniones y efectos no solamente económicos sino sociales y éticos. Se ha impulsado la inversión en este nuevo mercado, lo que gestó múltiples expectativas respecto a los cambios inherentes a la introducción del biocombustible a la economía nacional.

Como política implementada, se establece el porcentaje de etanol que se debe mezclar con la gasolina para ser utilizado en el sector transporte, además de proponer metas de consumo a mediano plazo. Dicho porcentaje fue establecido por el Ministerio de Minas y Energía en una relación inicial del 10%/90% para el Etanol y la gasolina respectivamente.

A partir de septiembre del 2005 comenzó a regir la norma que debe irse estableciendo progresivamente en todo el país, comenzando por los centros urbanos con mayor densidad de población (más de 500 mil habitantes). Esta demanda inicial, comenzó a ser atendida por parte de los principales ingenios azucareros del país, que encontraron en la caña de azúcar un gran potencial para la producción de Etanol, dadas sus características ideales tanto en facilidad de producción como en eficiencia energética.

La caña de azúcar es la materia prima para la producción del Etanol. Adicionalmente, de ésta se extraen productos de consumo humano como el azúcar y la panela. Por ello, frente al panorama actual, entran en juego diferentes opiniones de índole político,

económico y social respecto a los efectos que se pueden dar en el mercado de los derivados de la caña, especialmente sobre el azúcar.

La producción de azúcar entra a competir con la del Etanol, el cual se encuentra actualmente en una posición muy atractiva para los cultivadores de caña de azúcar que ven en éste un mercado rentable, dada la creciente demanda tanto interna como externa del producto [47]. Lo anterior, podría reflejarse en una alteración de la producción de azúcar, consecuentemente se vería afectada la satisfacción de su demanda y a la vez se presentaría una variación de su precio en el mercado, el cual tendería al alza.

Antes del 2005, el porcentaje de Etanol en la gasolina colombiana era nulo. Una vez implementada la ley 693, los principales centros urbanos han ido incrementando dicho porcentaje de forma paulatina, con el propósito de cumplir con la reglamentación vigente del 10%. Aunque en la actualidad solo se satisface aprox. el 60% de la demanda interna de este alcohol, se tiene proyectado un incremento en la porción de etanol en la gasolina al 15% en el 2010 y al 25% en el 2020 en todo el país. [48]

La demanda de Etanol podría entonces afectar tanto al consumidor final de azúcar como a la producción y distribución de la misma. Sería apropiado conocer a fondo la estructura de mercado de ambos productos, que permita observar el comportamiento del sistema frente a la variación de algunos de sus elementos más representativos y poder llegar a un planteamiento de nuevas políticas que mitiguen los posibles efectos negativos que puedan presentarse en su interacción.

## **6. PROPUESTA METODOLÓGICA**

### **5.1 Características del sistema**

Ante todos estos desafíos a los que se enfrenta el nuevo mercado del Etanol, se plantea la creación de un modelo dinámico e interdisciplinario que permita la caracterización, análisis y creación de propuestas de mejoramiento para el proceso evolutivo del sistema, que permitan mitigar los efectos nocivos que puedan derivarse del mismo.

En este contexto, la investigación de operaciones como disciplina científica caracterizada por la aplicación de teorías, métodos y técnicas especiales para buscar la solución de variados problemas generados en los diversos sistemas que existen en la naturaleza, y los creados por el ser humano [49], se convierte en una importante alternativa para la comprensión de este sistema en particular.

Con un enfoque de sistemas, a diferencia del enfoque tradicional, se puede estudiar el comportamiento de todo un conjunto de partes o subsistemas que interactúan entre sí, identificar el problema y analizar sus repercusiones, buscándose soluciones integrales que beneficien al sistema como un todo. Para hallar la solución, la investigación de operaciones generalmente representa el problema como un modelo matemático, que es analizado y evaluado previamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone la construcción de un modelo de causalidad que analice las relaciones entre las variables que hacen parte del sistema. Se propone la realización de experimentos de simulación con diferentes escenarios utilizando el modelo construido, que permita visualizar el comportamiento de las variables relacionadas en el mismo, en diferentes períodos de tiempo y bajo circunstancias diferentes.

La creación de este modelo dinámico y sistémico, permitirá obtener un perfil de comportamiento de cada subsistema, integrar los resultados obtenidos y ver su interacción, además de crear políticas de mejoramiento que faciliten la toma de decisiones estratégicas.

La problemática de interés, posee los elementos claves que validan la pertinencia de la Dinámica de Sistemas para su estudio:

1. Realimentación: Los efectos de la penetración del etanol afectan los cultivos de la caña de azúcar, los cuales a su vez afectan los precios del azúcar y consecuentemente el balance importación/exportación de la misma. Esto genera ciclos de realimentación que generan complejidad para la toma de decisiones.

2. No linealidad: Las relaciones causa efecto en el sistema son, en la mayoría de los casos, no lineales. Por ejemplo, el conocido caso de la demanda del azúcar, donde un determinado cambio en el precio puede magnificar el cambio en la demanda.

3. Retardos: Las relaciones causa-efecto que ocurren al penetrar el etanol en la economía nacional ocurren en diferentes períodos de tiempo.

Por todo lo anterior, el modelo se pretende desarrollar con base en la metodología propia de la Dinámica de Sistemas.

## **5.2 Dinámica de Sistemas**

La Dinámica de Sistemas es una Metodología creada en el MIT (USA) por el Profesor Jay Forrester a fines de la Década de 50. En ésta metodología la simulación permite obtener lineamientos de los comportamientos para las variables incluidas en cualquier modelo, a través de la aplicación de técnicas de integración numérica. Es importante tener en cuenta que estos comportamientos no se interpretan como predicciones, sino como proyecciones o tendencias.

El propósito de los modelos de Dinámica de Sistemas es llegar a comprender cómo la estructura del sistema es responsable de su propio comportamiento. Esta comprensión debe proporcionar un marco favorable para la determinación de las políticas y/o acciones que puedan mejorar el funcionamiento del sistema o resolver los problemas que éste presenta.

La importancia de la Dinámica de sistemas radica en que estas acciones pueden ser simuladas a un bajo costo, por lo que es posible estimar sus resultados sin necesidad de ponerlas en práctica sobre el sistema real.

Esta metodología es apropiada para modelar situaciones que cambian en función del tiempo o bien donde se puede visualizar que los efectos vuelven a afectar a la causa (realimentación). La construcción de un modelo mediante esta metodología, conlleva la realización de las siguientes etapas [50]:

1. Articulación del problema:

- Definición del propósito del modelo.
- Definición de las fronteras del modelo.
- Establecer un horizonte de tiempo.
- Identificación de las variables principales.
- Identificación del problema dinámico (modos de referencia).

2. Formulación de la Hipótesis dinámica:

- Descripción del comportamiento o modelado de los comportamientos de referencia de las variables principales (endógenas).
- Diagramación de los mecanismos básicos y los ciclos de realimentación del sistema (mapeado).

3. Formulación de un modelo de simulación:



- Conversión de los diagramas de retroalimentación en diagramas de flujos y almacenamientos (niveles).
- Especificación de la estructura.
- Planteamiento de ecuaciones y de las condiciones iniciales.
- Estimación y selección del valor de los parámetros.
- Desarrollo del modelo formal de simulación en un software especializado.

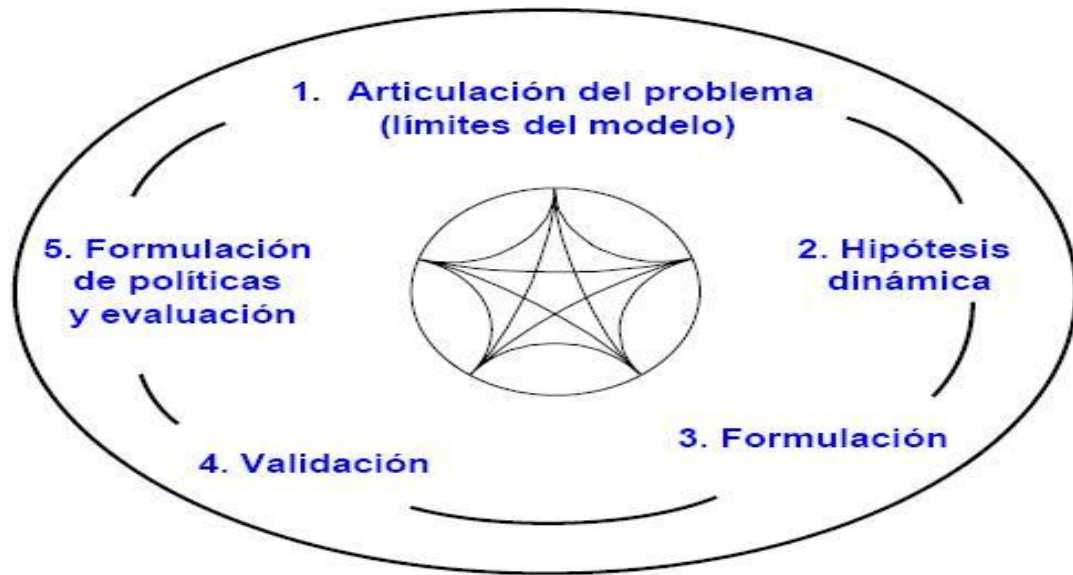
#### 4. Validación:

- Simulación del modelo y prueba de las hipótesis dinámicas.
- Prueba de los supuestos del modelo.
- Prueba del comportamiento del modelo y la sensibilidad a perturbaciones.
- Validación de la estructura del sistema.
- Validación del comportamiento simulado del modelo.

#### 5. Formulación de políticas y evaluación:

- Especificación del escenario.
- Diseño de políticas.
- Prueba de la respuesta del modelo a las diferentes políticas.
- Análisis de sensibilidad.
- Interacción de políticas.
- Traducción de los resultados del estudio a una forma accesible.

Nota: Los resultados en cada paso son información útil para pasos anteriores y posteriores, lo que hace que el proceso de modelamiento sea iterativo.



**Figura1. Proceso de Modelamiento Iterativo de Dinámica de Sistemas (Adaptado de Sterman, 2000)**

Para el alcance del presente trabajo se llevaron a cabo las 4 primeras etapas, dejando como trabajo futuro el planteamiento de escenarios y políticas de mejora al sistema.

### 5.3 Supuestos del Modelo

Se busca observar el comportamiento del sistema frente a la variación de algunos de sus elementos más representativos y poder llegar a un planteamiento de nuevas políticas y estrategias que coadyuven a mitigar los efectos negativos que puedan originarse con la penetración del Etanol en la economía nacional. Por lo tanto, se hace necesario plantear un modelo que permita analizar la dinámica de las diferentes interacciones que dan lugar a la problemática y a partir de esto poder llegar más adelante al planteamiento de posibles políticas preventivas y/o correctivas.

Se presentan a continuación los principales supuestos que dieron soporte a la construcción del modelo:

La estructura de los mercados del azúcar y del Etanol por separado, se ha modelado con base en el tradicional Modelo Económico de Oferta-Demanda [51], en el cual se afirma que la cantidad de productos ofrecidos por los productores y la cantidad de productos demandados por los consumidores dependen del precio de mercado del producto.

Según esto, la oferta es directamente proporcional al precio; cuanto más alto sea el precio del producto, más unidades se ofrecerán a la venta. Por el contrario, la demanda es inversamente proporcional al precio, es decir, cuanto más alto sea el precio, menos demandarán los consumidores. Se tendrá en consideración las unidades más representativas del sistema en estudio, en este contexto. Se describirá la interacción entre los elementos inmersos en cada mercado, como sistemas independientes, siguiendo los parámetros de comportamiento característicos del modelo expuesto anteriormente.

Adicionalmente, el Precio del Etanol para un escenario preliminar se tomará como fijo, con un valor mínimo inicial de \$ 7.650,94 por galón (equivalente a \$ 2.021,38 por litro aprox.) [52], el cual se encuentra regulado por el Ministerio de Minas y Energía. [53]

Respecto a la disponibilidad de tierras para cultivar, el límite de éstas es de 40 millones de hectáreas. En cuanto a las exportaciones de Etanol, estas se descartan, aunque en estudios posteriores se realizarán simulaciones incluyéndolas, pues es un factor clave que puede potenciar el mercado del Etanol en el país y que incidirá de forma significativa en la satisfacción de la demanda interna. Esto puede ser una realidad en corto tiempo, debido a la creciente demanda mundial por este biocombustible y a su inclusión en los términos del TLC entre Colombia y Estados Unidos.

Por último, respecto a los productos derivados de la caña de azúcar, según el alcance del presente trabajo, se parte del supuesto de que solo existen el azúcar y el Etanol. Otro tipo de derivados serán objeto de estudios posteriores.

## 5.4 Hipótesis Dinámica

Teniendo en cuenta los supuestos anteriormente mencionados, se plantea el siguiente esquema a nivel macro del sistema:

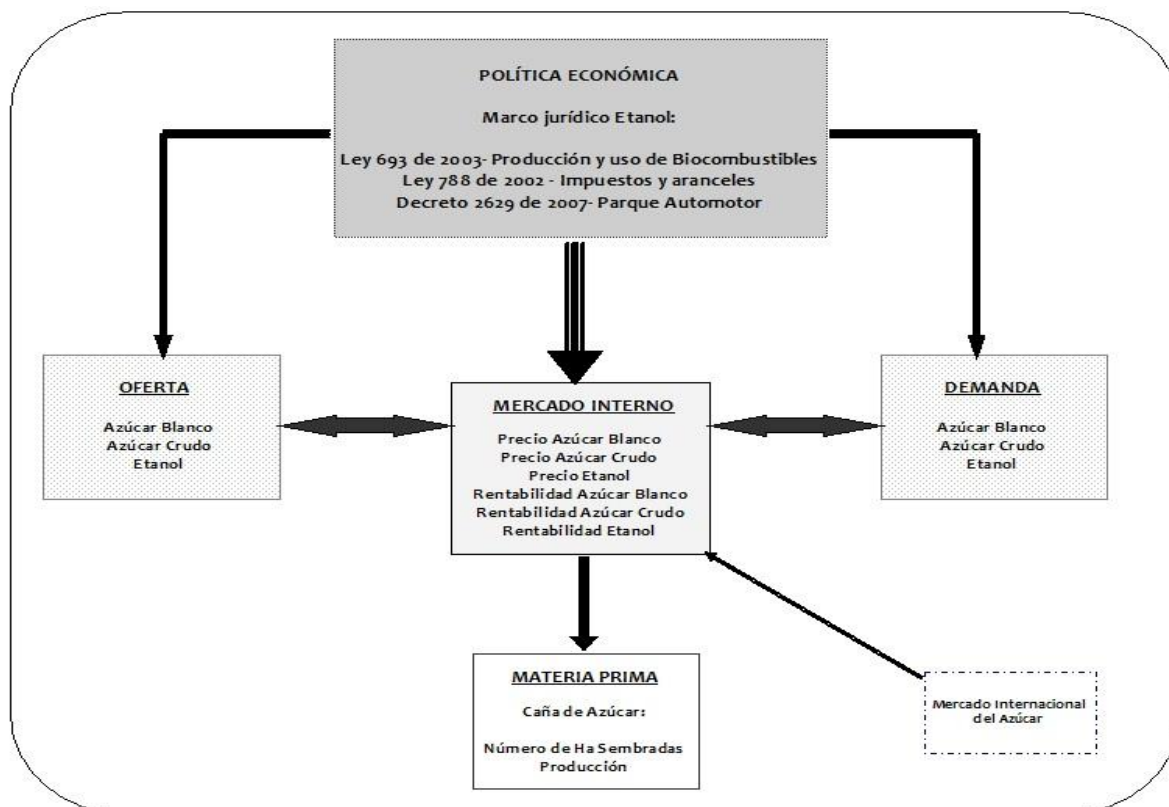


Figura2. Esquema Macro del Sistema. Producción Etanol vs Producción Azúcar

Se pueden apreciar los elementos principales que estructuran del sistema: La política planteada, la materia prima, y la interacción de los dos mercados que entran en competencia.

A continuación, se presentan las interacciones de cada subsistema (Mercado del Azúcar y Mercado del Etanol) por separado y posteriormente el sistema resultante con la dinámica que se genera a partir de la interacción de los dos subsistemas.

### 5.4.1 Dinámica del Mercado del Azúcar

El primer componente (ver Figura 3) correspondiente a la dinámica del mercado del azúcar está constituido por dos ciclos, uno de balance y otro de refuerzo. En el ciclo de balance (B1) se puede observar cómo los cultivos de caña de azúcar y su producción están determinados por la rentabilidad de los productos que se derivan de ésta y a la vez, la producción de caña determina en gran medida el nivel de satisfacción de la demanda de azúcar. El ciclo de refuerzo (R1), muestra la interacción entre el precio del azúcar y la demanda.

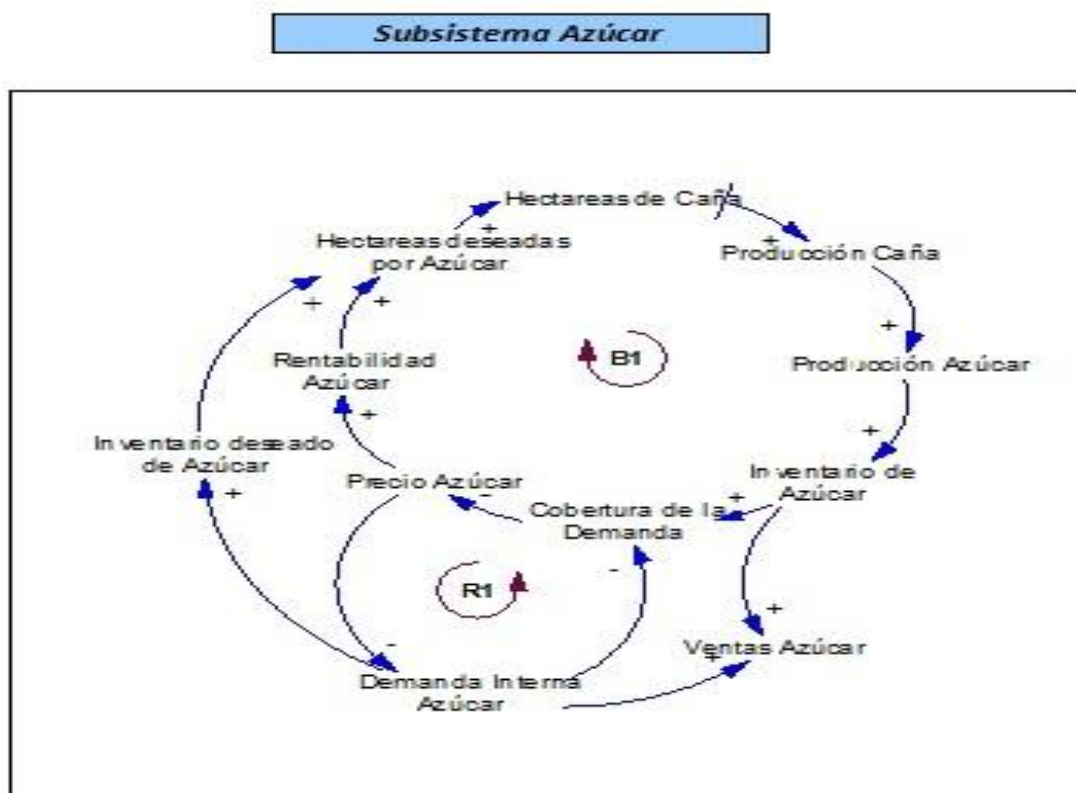


Figura 3. Dinámica del mercado del azúcar: Interacción de los elementos principales que constituyen el mercado del azúcar.

Más específicamente, se puede observar que un aumento en la rentabilidad del azúcar, hace mucho más atractivo sembrar caña; por lo tanto, se desearían más hectáreas para cultivar y al aumentar estas, la producción de caña va a ser mayor, incrementándose así, la producción de azúcar. Cuando la producción de azúcar aumenta demasiado superando la demanda, esta comienza a acumularse, presentándose un exceso de oferta y haciendo que el precio del azúcar comience a bajar, lo que afecta tanto la demanda como la rentabilidad que se obtiene a partir de este producto.

#### **5.4.2 Dinámica del Mercado del Etanol**

En el segundo componente (ver figura 4) correspondiente a la dinámica del mercado del Etanol, se evidencia al igual que en el primero, la importancia de la caña de azúcar en el sistema, ya que es la materia prima de donde proviene este biocombustible.

También se presentan dos ciclos B<sub>2</sub> y R<sub>2</sub>, de balance y refuerzo respectivamente. En el ciclo B<sub>2</sub>, puede verse cómo la producción de caña es un factor determinante en la producción de Etanol, lo que a la vez influye en la cantidad de caña de azúcar cultivada. En el ciclo R<sub>2</sub>, se observa cómo la rentabilidad producida por el Etanol determina la cantidad de caña que se va a asignar a la producción del mismo. Además se presentan otros elementos de gran importancia para la descripción del sistema, como el costo del inventario, consumo y demanda interna.

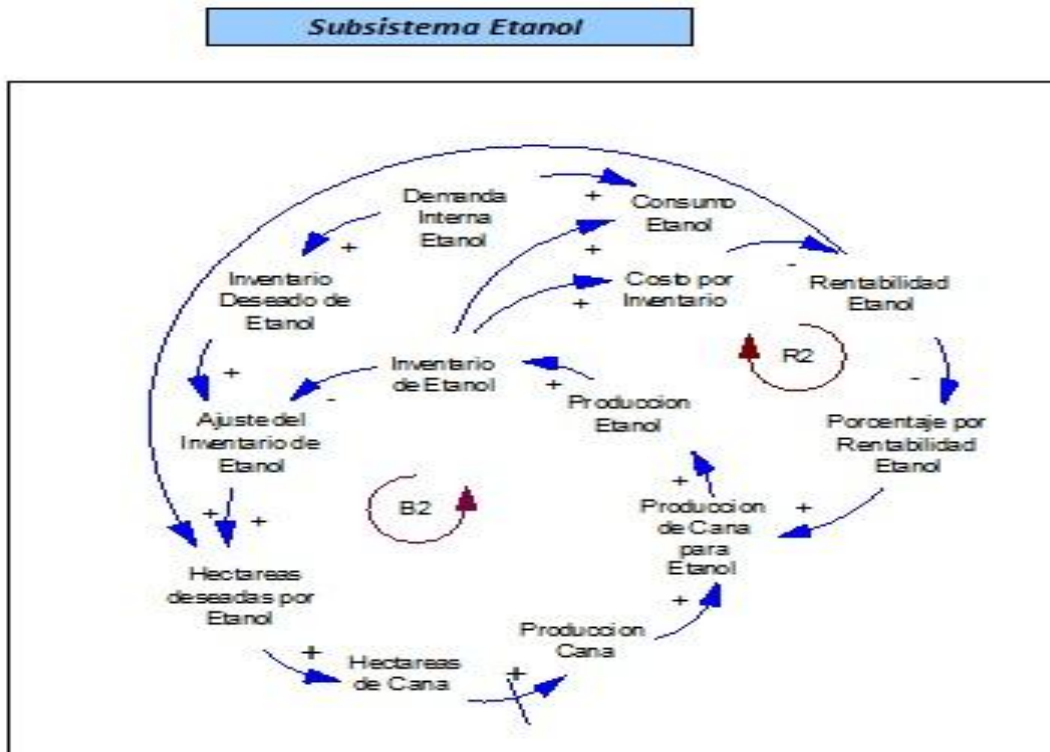


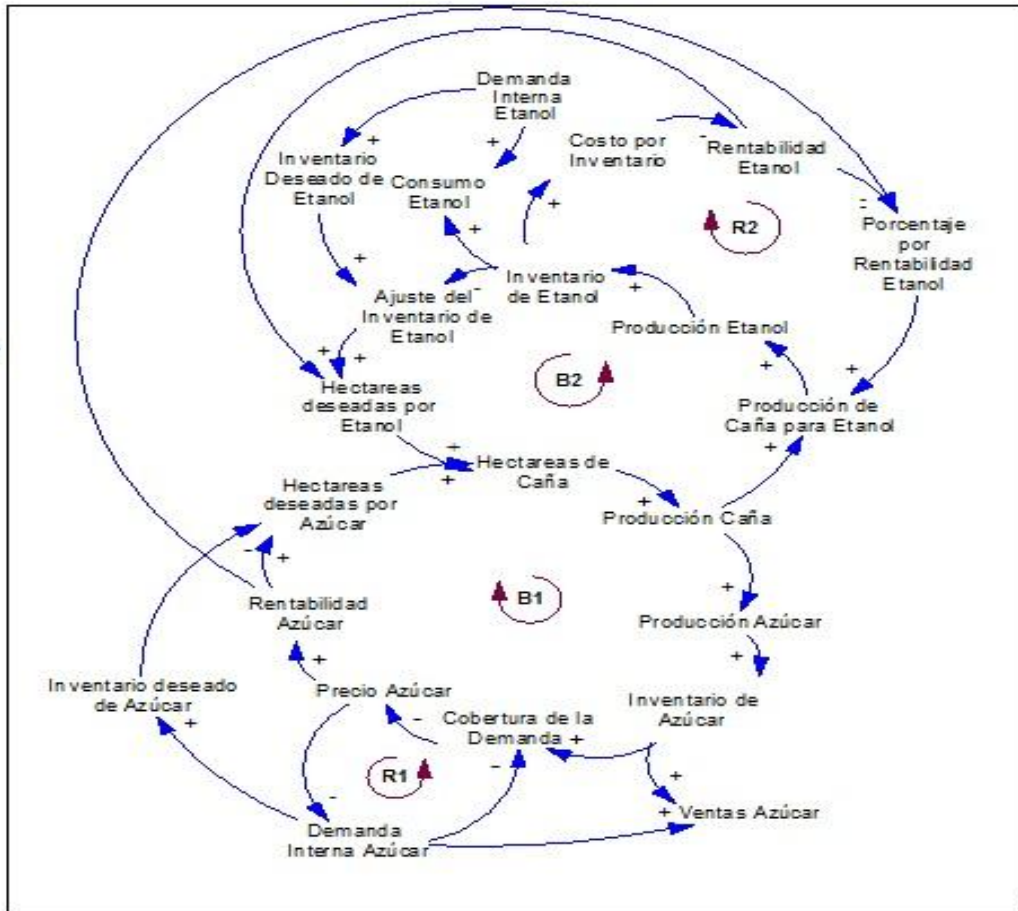
Figura 4. Dinámica del mercado del Etanol: Interacción de los principales elementos que conforman el mercado del Etanol.

### 5.4.3 Interacción Mercado del Azúcar vs Mercado del Etanol

En la figura 5, se integran los dos componentes ilustrados anteriormente. En la descripción realizada en los párrafos preliminares se hizo referencia a cada producto por separado (Etanol y azúcar), a continuación, se muestra cómo los dos productos interactúan compitiendo por la materia prima destinada para su producción (la caña de azúcar).

La caña producida va a ser destinada tanto a la producción de azúcar como a la producción de etanol, siendo la rentabilidad y el inventario de estos dos productos, los encargados de definir cómo se reparte esta producción de caña y cómo varían las hectáreas cultivadas.

### Sistema Integrado Azúcar-Etanol



**Figura 5. Interacción de los Mercados del Azúcar y Etanol.** Con la introducción del Etanol en la economía, comienza a presentarse una dinámica en el comportamiento de los diferentes elementos que conforman los mercados del etanol y del azúcar, ambos mercados interactúan unidos por un elemento en común que es la producción de caña.

Se observa que existe un interés en producir Etanol o azúcar, generado a partir de las rentabilidades de ambos productos. Según dicho interés, la rentabilidad del Etanol puede determinar a mediano plazo, la producción de azúcar.

Si la rentabilidad del Etanol aumenta, se hace menos atractivo producir azúcar, lo que se refleja en una disminución en su inventario y consecuentemente disminuirá su oferta en el mercado.

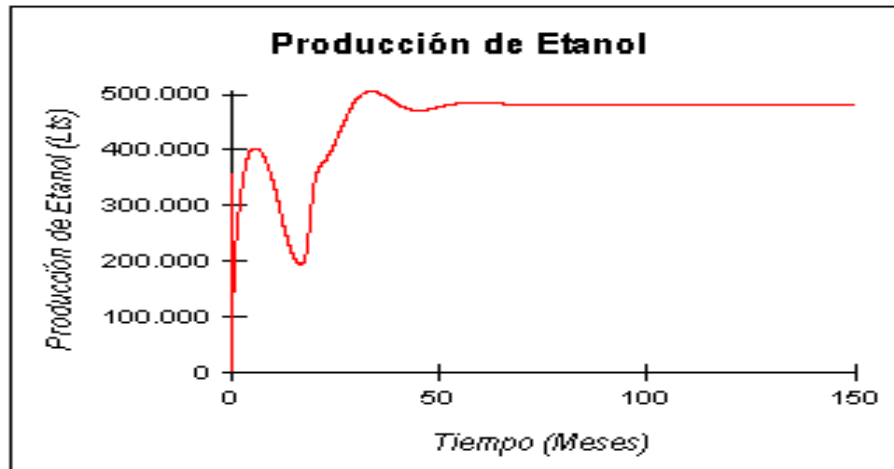


Al no haber inventario de azúcar, el precio de ésta aumenta, se incrementan las hectáreas deseadas para cultivar, lo que conlleva a la decisión de sembrar más caña. Esto aumenta su producción e incrementa a la vez la producción y oferta de Etanol. Lo anterior influye negativamente en el precio del Etanol y como consecuencia se obtendría menos rentabilidad por parte de éste, aumentando así el interés en producir azúcar.

### **5.5 Resultados de la Simulación (Escenario base)**

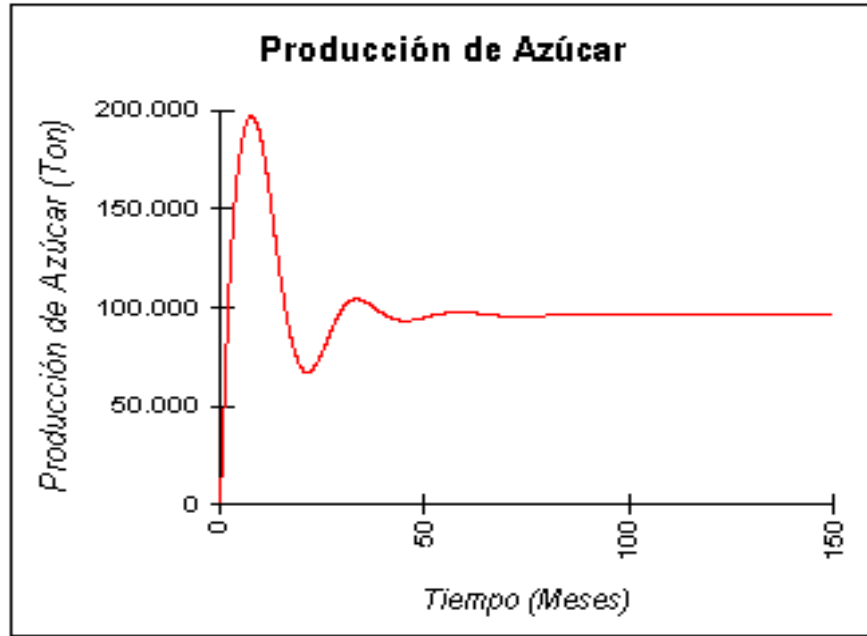
A partir del diagrama causal presentado en la figura 5 y teniendo en cuenta los supuestos mencionados, se efectuó una simulación cuyos resultados permiten analizar el comportamiento de la producción del azúcar, y los efectos que tiene sobre el consumidor. Estos efectos se estimarán según el comportamiento del precio y las ventas de azúcar después de la entrada del Etanol en la economía Colombiana y el crecimiento paulatino de su producción según las metas planteadas por el gobierno.

Según los resultados arrojados por el modelo, y como era de esperarse según el aumento progresivo tanto en el porcentaje de mezcla, como en el número de ciudades en las que se implementa la norma, la producción de Etanol inicialmente tiende a aumentar de forma irregular (ver figura 6).

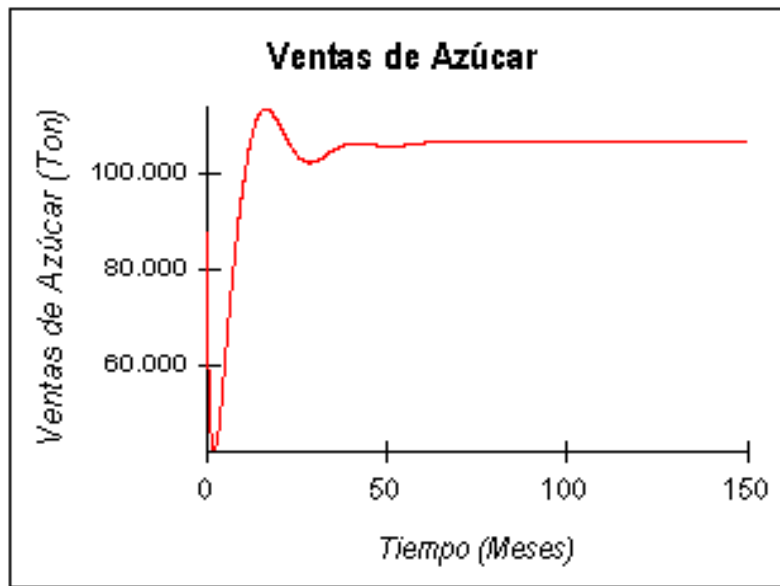


**Figura 6. Producción de Etanol.** La producción de etanol después de oscilar en un rango de 200 a 500 mil lt/mes aprox. durante los primeros 45 meses, tiende a estabilizarse en un valor cercano a los 500 mil lt/mes.

En los primeros 20 meses el efecto que causa sobre la producción de azúcar no es tan significativo pues ésta también crece (ver figura 7). Esto indica que los ingenios azucareros aún no se enfrentan a la decisión sobre cuál de los dos productos se debe priorizar según la cantidad de materia prima disponible (caña de azúcar), pero por el contrario, y aunque las ventas de azúcar también aumentan en este periodo (ver figura 8), el consumidor se ve seriamente afectado pues el precio del azúcar aumenta significativamente cuando se comienza a producir Etanol, alcanzando a duplicarse durante los primeros 12 meses aprox.



**Figura 7. Producción de Azúcar.** La producción de azúcar varía en el lapso de los 45 meses iniciales de la simulación para estabilizarse alrededor del mes 50.



**Figura 8. Ventas de Azúcar.** Las ventas de azúcar presentan un importante aumento al iniciar la simulación y después de una leve caída se estabilizan en el período 50, en un valor cercano a las 100 mil ton/mes.

Luego tanto las ventas como la producción de azúcar sufren una caída como respuesta al progresivo crecimiento en la producción de Etanol y los altos precios del azúcar que también se derivan del aumento en la producción de Etanol.



**Figura 9. Precio del Azúcar.** Después de un aumento importante (se duplica) en el precio del azúcar, que se presenta durante los primeros 12 meses de la simulación; precedido por un descenso que llega a un nivel muy cercano al inicial, éste encuentra su equilibrio alrededor del mes 55.

Como se puede apreciar en las gráficas, ambos mercados sufren cambios significativos durante los primeros 50 periodos de simulación, y a partir del mes 50 se estabilizan los elementos de cada uno de ellos; un ejemplo de esto es el precio del azúcar, el cual se estabiliza en un valor cercano al que se tenía antes de la introducción del Etanol al mercado Colombiano (ver figura 9)

El anterior fue un panorama del escenario que se enfrenta en este momento, la simulación se realizó con los parámetros y elementos más representativos del sistema real que se está considerando en Colombia. La simulación fue realizada para un periodo de 150 meses (10 años aprox.), teniendo en cuenta que este es el tiempo establecido por el gobierno para alcanzar un porcentaje del 25% de Etanol en la gasolina del país.

## 6. TRABAJOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Etanol es un producto cuya demanda está creciendo aceleradamente en todo el mundo. A partir de la ley 693 de 2001, se puso en marcha en Colombia el mercado de este biocombustible. Se prevé, que al igual que ocurrió en otros países, se vean afectados otros elementos de la economía nacional, en especial aquellos procedentes de los productos agrícolas que sirven como materia prima para la elaboración de este Alcohol.

En el presente trabajo se analizó esta situación reduciendo su complejidad a un solo producto agrícola, el azúcar, el cual se produce a partir de la caña de azúcar, principal materia prima de la que se extrae el Etanol actualmente en Colombia. A partir de los resultados de la simulación, se observó cómo inicialmente, al interactuar ambos mercados se presentan cambios de importancia, principalmente en la producción y ventas de azúcar, pero que luego de un periodo de 4 años aproximadamente tienden a estabilizarse, llegando a niveles cercanos al inicial.

Como trabajo futuro, se pretende extender esta perspectiva, y analizar el comportamiento que tendrían frente a la producción de Etanol, otros derivados de la caña, como por ejemplo la panela. Existen además, otros elementos de importancia que experimentan de una u otra forma la influencia de este nuevo mercado en el país y que sería interesante y pertinente analizar. Por ejemplo, cuando se habla de la materia prima para producir biocombustibles, se hace referencia a cultivos que en la mayoría de los casos, son plantados con fines alimentarios. En este sentido, es de gran importancia el cuestionamiento sobre los posibles efectos de la integración de este nuevo mercado, sobre la soberanía alimentaria de los pueblos, las pequeñas agriculturas familiares y en la biodiversidad. Lo anterior, teniendo en cuenta además la escala del fenómeno, ya que sus efectos a nivel local están en estrecha relación con su dinámica a nivel global.

Por otra parte, uno de los factores que más ha impulsado el “boom” de los biocombustibles es la idea que se tiene de un beneficio ambiental, pero este solo ha sido valorado para un corto plazo. Se sabe que la mayor causa del efecto invernadero es la producción de CO<sub>2</sub> generado por la combustión de los automotores en todo el mundo. Es importante entonces explorar también el efecto ambiental a un mediano y largo plazo para evaluar si los argumentos referentes al medio ambiente de la propuesta permanecen. Lo anterior, teniendo en cuenta por ejemplo, el hecho de que la utilización a largo plazo de tierra en barbecho para la producción de cultivos energéticos, implicaría la emisión de cantidades considerables de CO<sub>2</sub>. Esto último, es debido a que la tierra libera CO<sub>2</sub> cuando la materia orgánica se mineraliza y por ende la tierra rica en materia orgánica libera aún más CO<sub>2</sub>. Existen otras situaciones referentes al tema, que también se han dejado fuera del debate, en el presente análisis.

Este trabajo fue una primera aproximación metodológica al problema planteado, a partir de la cual se puede afirmar que la creación del mercado del Etanol en Colombia implica cambios significativos a nivel económico, lo cual puede influir también en lo político y social.

Una de las principales expectativas frente al este mercado emergente, es su esperada contribución a la generación de nuevos empleos, su conversión en una importante fuente de divisas para el país a mediano plazo y el impacto social positivo que se espera que tenga en lo referente a la reducción de costos por galón de Bioetanol, en comparación con los hidrocarburos. Por lo anterior, existe la necesidad de examinar nuevas estrategias que posibiliten el sostenimiento, rentabilidad y beneficio. Queda abierto un amplio horizonte para investigar sobre el tema.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

1. **FERNÁNDEZ DURÁN, Ramón.** “El inicio del fin de la era de los combustibles Fósiles”. Ecologistas en Acción, Madrid. 2006.
2. **BRAVO, Elizabeth; HO, Mae-Wan.** “Las nuevas repúblicas del biocombustible”. Red del Tercer Mundo, Third World Network. 2006.
3. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009
4. **BP plc.** “Statistical Review of World Energy June 2008”. London, UK. Sitio web: <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> Consultado el 2 de Marzo de 2010.
5. **ASOCAÑA.** “Informe Anual del Sector Azucarero Colombiano”, 2008.
6. **WALLACE, Ed. BloombergBusinessweek.** “Oil Prices Are All Speculation”, 27 Junio 2008. Sitio web: <http://www.businessweek.com/stories/2008-06-27/oil-prices-are-all-speculationbusinessweek-business-news-stock-market-and-financial-advice> Consultado el 22 de febrero de 2010.
7. **MACQUEEN, DUNCAN y KORHALILLER, Sibel.** “Bundles of energy. The case for renewable biomass energy”. International Institute for environment and development Natural Resource Issues. No.24. UK. 2011.
8. **FURTADO, André.** “Biocombustibles y comercio internacional: Una perspectiva latinoamericana”. Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL). Impreso por las Naciones Unidas, Santiago de Chile. 2009.

9. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
10. **U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION.** "Renewable Energy Consumption and Electricity. Preliminary Statistics 2010". Assistant Administrator for Energy Analysis. Office of Electricity, Coal, Nuclear, and Renewables. Renewable Analysis Team. U.S. Department of Energy. Washington. Junio 2001.
11. **PERRY, GOPINATH, JAEGER, SORTE y EGELKRAUT.** “Biofuel Production and Consumption in the United States: Some facts and answers to common questions”. Faculty in the Department of Agricultural and Resource Economics at Oregon State University. 2008.
12. **PERRY, GOPINATH, JAEGER, SORTE y EGELKRAUT.** “Biofuel Production and Consumption in the United States: Some facts and answers to common questions”. Faculty in the Department of Agricultural and Resource Economics at Oregon State University. 2008.
13. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
14. **TORRES y CARRERA.** “Informe biocombustibles”, Consultores de Comunicación. 2010. p8. Documento electrónico: <http://torresycarrera.com/files/Informes/Informe-Biocombustibles-2010.pdf> Consultado el 10 de Marzo de 2010.
15. **TORRES y CARRERA.** “Informe biocombustibles”, Consultores de Comunicación. 2010. Documento electrónico: <http://torresycarrera.com/files/Informes/Informe-Biocombustibles-2010.pdf> Consultado el 10 de Marzo de 2010.



16. **TORRES y CARRERA.** “Informe biocombustibles”, Consultores de Comunicación. 2010. Documento electrónico: <http://torresycarrera.com/files/Informes/Informe-Biocombustibles-2010.pdf> Consultado el 10 de Marzo de 2010.
17. **ODARDA, Omar.** “Panorama sobre el mercado de biocombustibles en China”, Agregado Agrícola en la Embajada Argentina en la R. P. China. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. 2011.
18. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
19. **INFINITA RENOVABLES.** “Informe Sectorial 2010”. Documento Electrónico: [www.infinita.eu/download.php?file=Informe%20Infinita\\_AC\\_52.pdf](http://www.infinita.eu/download.php?file=Informe%20Infinita_AC_52.pdf)
20. **AUTHENTICATED U.S. GOVERNMENT INFORMATION.** “Agricultural Risk Protection Act of 2000”. PUBLIC LAW 106–224, Junio 20. 2000. Title III - Biomass research and development act of 2000. Documento electrónico: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-106publ224/pdf/PLAW-106publ224.pdf>
21. **FEDERAL REGISTER / Vol. 74, No. 87 / Thursday, May 7, 2009 /** “Biofuels and Rural Economic Development”. Presidential Documents. Documento electrónico: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2009-05-07/pdf/E9-10861.pdf>.
22. **UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE.** "Biomass Crop Assistance Program". Documento electrónico: [http://www.fsa.usda.gov/Internet/FSA\\_File/bcap09spanish.pdf](http://www.fsa.usda.gov/Internet/FSA_File/bcap09spanish.pdf)
23. **BECKMAN, Jayson; HERTEL, Thomas; TAHERIPOUR, Farzad and TYNER, Wallace.** “Structural change in the biofuels era”. European Review of agricultural economics. Vol 39. 2012.

24. **EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** “Renewable Fuel Standard (RFS)”. Sitio web: <http://www.epa.gov/otaq/fuels/renewablefuels/index.htm>
25. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
26. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
27. **ÁLVAREZ MACIEL, Carlos.** “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. Revista Economía Informa – UNAM. Núm. 359 Julio-Agosto. 2009.
28. **CARDONA, Omar D.** “Indicators for Disaster Risk Management. Information and Indicators Program for Disaster Risk Management”. IADB - ECLAC – IDEA. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. Instituto de estudios ambientales - IDEA. Colombia. 2004.
29. **FEDERACIÓN NACIONAL DE BIOCOMBUSTIBLES - FEDEBIOCOMBUSTIBLES.** “Mitos y realidades de los biocombustibles en Colombia”. 2011. Colombia. Documento electrónico: [http://www.fedebiocombustibles.com/files/REVISTA%20MITOS%20Y%20REALIDADES\(2\).pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/files/REVISTA%20MITOS%20Y%20REALIDADES(2).pdf)
30. **SENADO.** “Diario Oficial No. 44.564, de 27 de septiembre de 2001”. Colombia. Sitio web: [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley/2001/ley\\_0693\\_2001.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley/2001/ley_0693_2001.html)

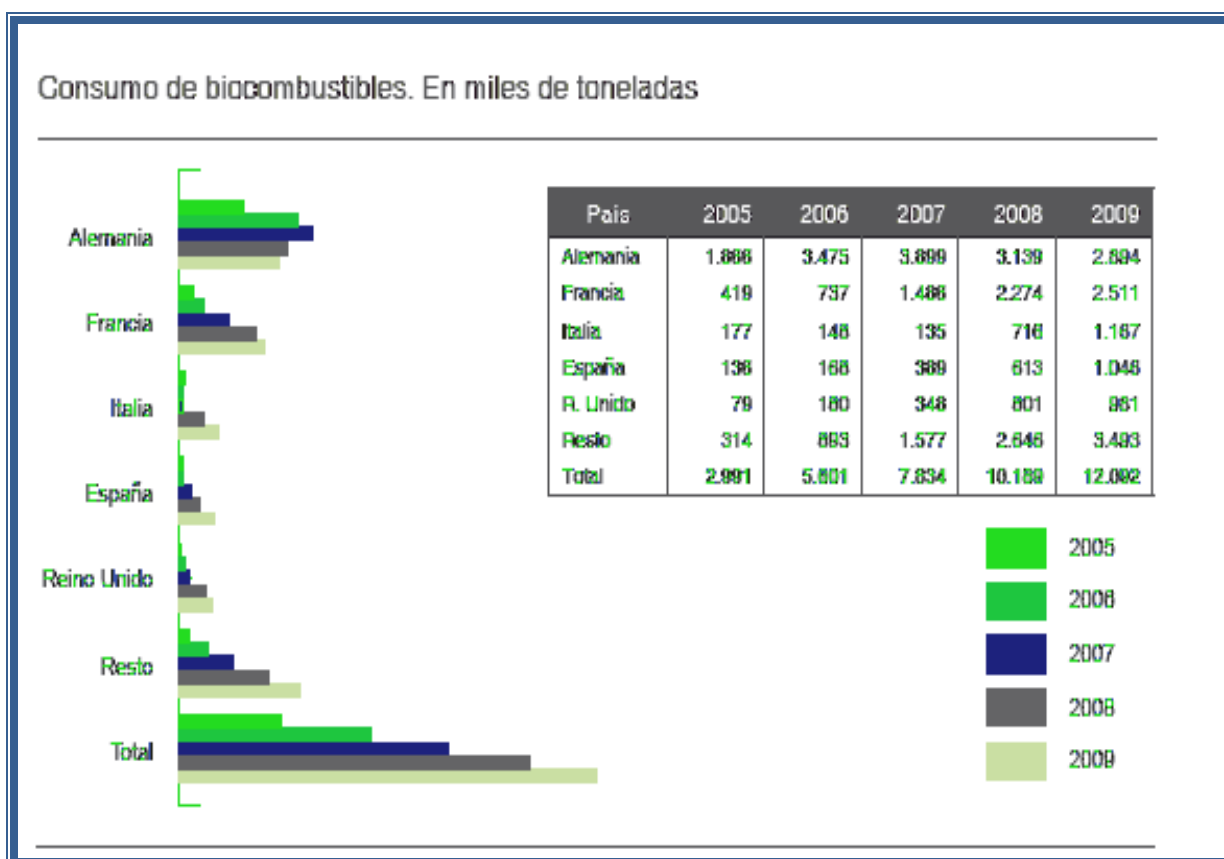
31. **SENADO.** “Diario Oficial No. 45.046 de 27 de diciembre de 2002”. Colombia. Sitio web:  
[http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley/2002/ley\\_0788\\_2002.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley/2002/ley_0788_2002.html)
32. **MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.** “Resolución 447 de 2003”. Colombia. Sitio web:  
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15720>]
33. **MINISTERIO DE MINAS.** “Resolución 181078”. Colombia. Sitio web:  
[http://www.minminas.gov.co/minminas/kernel/usuario\\_externo\\_normatividad/form\\_consultar\\_normas\\_hidrocarburos.jsp?parametro=2569&site=17](http://www.minminas.gov.co/minminas/kernel/usuario_externo_normatividad/form_consultar_normas_hidrocarburos.jsp?parametro=2569&site=17)
34. **FEDEBIOCOMBUSTIBLES.** “Los biocombustibles, un derecho estratégico de los Colombianos”. Número 1. Abril de 2012. Página 6. Colombia.
35. **ALCALDÍA DE BOGOTÁ.** “Decreto 2629 de 2007”. Colombia. Sitio web:  
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=25667>
36. **CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL.** “CONPES N°3510”. Colombia. Sitio web:  
<http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/hidrocarburos/Biocombustible/Conpes203510.pdf>
37. **DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN- DNP.** “Lineamientos de política para promover la producción sostenible de Biocombustibles en Colombia”, 2008. Colombia. Página 27. Documento electrónico:  
<http://www.fenalce.org/archivos/conpesbiocombustibles.pdf>
38. **DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN- DNP.** “Lineamientos de política para promover la producción sostenible de Biocombustibles en Colombia”, 2008.

- 39. FEDEBIOCOMBUSTIBLES.** Federación Nacional De Biocombustibles De Colombia. “Los biocombustibles, un derecho estratégico de los Colombianos”. Colombia. 2010.
- 40. ROSEGRANT, Mark W; CLINE, Sarah A; LI, Weibo; SULSER, Timothy B. and VALMONTE-SANTOS Rowena A.** “Looking Ahead. Long-Term Prospects for Africa’s Agricultural Development and Food Security”. International Food Policy Research Institute - IFPRI. Agosto de 2005. Documento electrónico: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/pubs/2020/dp/vp41.pdf>
- 41. ECOPETROL S.A., ICP.** “Efecto del Etanol sobre las Propiedades Físico Químicas de las Gasolinas Colombianas y Desempeño en Motores y Vehículos”. Bogotá D.C. Colombia. 2005.
- 42. MONSALVE, Jhon F; MEDINA, Victoria; RUIZ, Ángela.** “Producción de Etanol a partir De la cáscara de Banano y de almidón de Yuca”. Grupo de Bioprocesos / Grupo de Combustibles alternativos, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. 2006.
- 43. MONTOYA, Maria Isabel; CARDONA, Carlos; TORO, Oscar; QUINTERO, Julián.** “Producción de Etanol carburante: material lignocelulósico una nueva alternativa”. Grupo de Investigación en Procesos Químicos Catalíticos y Biotecnológicos. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales. 2006.
- 44. FLÓREZ BERRÍO, Ana María.** "Modelo regional de producción y transporte de biocombustibles en Colombia" (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2011.

45. **ZAPATA RAMIREZ, Sebastián.** "Modelo del mercado de la palma de aceite en Colombia, utilizando dinámica de sistemas". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. 2010.
46. **FLÓREZ, Ana María y OCHOA, Camila.** "Aplicación De La Dinámica De Sistemas Para El Análisis De Políticas En La Producción De Biocombustibles". (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. 2008.
47. **ASOCIACIÓN DE CULTIVADORES DE CAÑA DE AZÚCAR DE COLOMBIA – ASOCAÑA.** "Aspectos Generales del sector azucarero 2004-2005". Sitio web: <http://www.asocana.com.co>
48. **UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.** "Biocombustibles en Colombia". Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. Colombia. Abril de 2009. Sitio web: [http://www.upme.gov.co/Docs/Biocombustibles\\_Colombia.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Biocombustibles_Colombia.pdf)
49. **HILLIER F, LIEBERMAN G.** "Introducción a la investigación de operaciones". McGraw-Hill. 1991.
50. **STERMAN, J.** "Business Dynamics. System Thinking and Modeling for a Complex World". 2000. Boston: McGraw-Hill.
51. **RIONDA RAMÍREZ, J. I.** "Microeconomía". Edición electrónica gratuita. Sitio web: <http://www.eumed.net/libros/2006a>
52. **MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.** "Resolución N°180405 de marzo 28 de 2008". Bogotá D.C. Colombia. 2008.
53. **MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.** Resolución. "Circular de precios de la Gasolina". Octubre 31 de 2012.

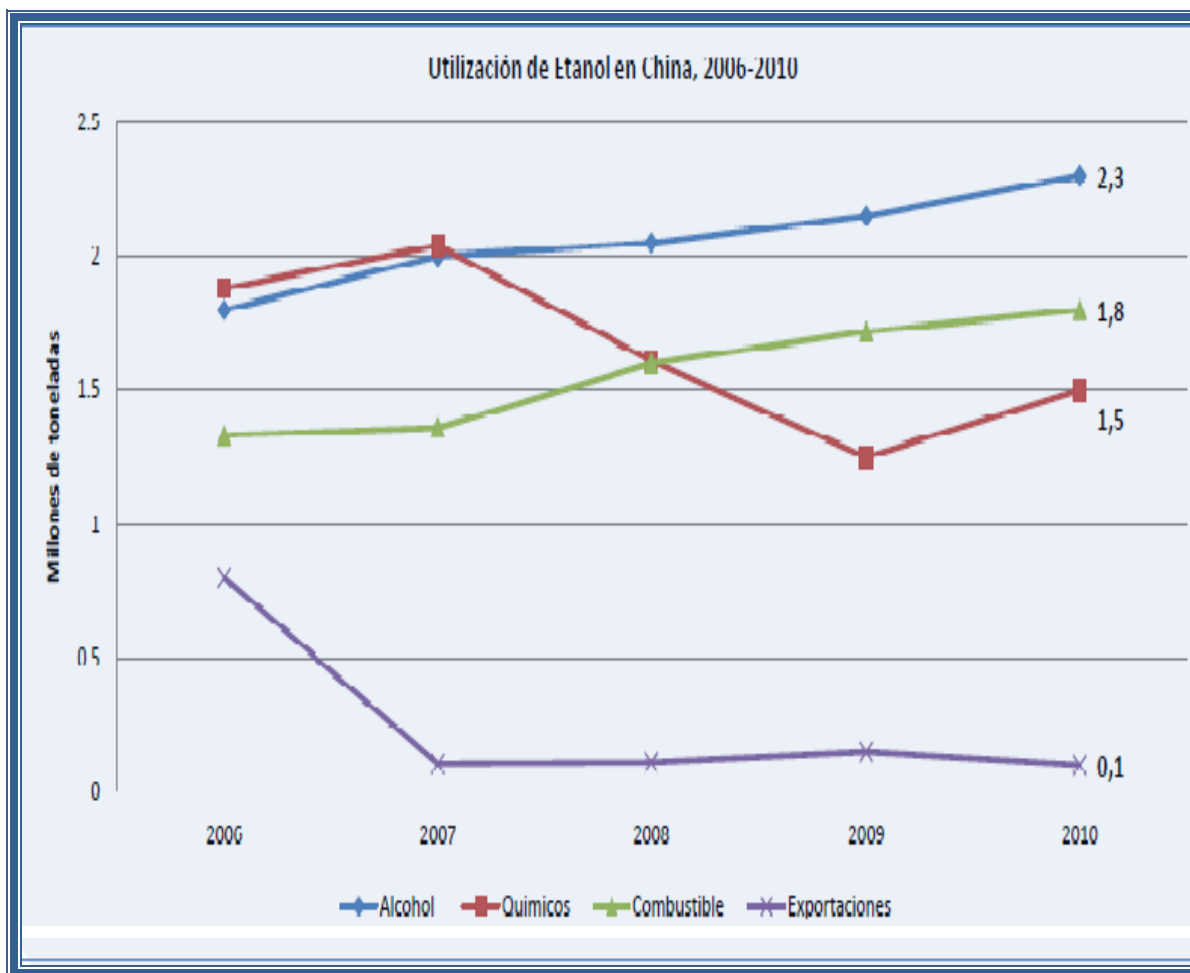
## ANEXOS

### Anexo 1. Gráfica. Consumo de biocombustibles en miles de toneladas en Europa



Fuente: Torres y Carrera Torres y Carrera Consultores de Comunicación. “Informe biocombustibles”, 2010. p8.

Anexo 2. Gráfica. Utilización del alcohol en China del 2006 al 2010



Fuente: “Panorama sobre el mercado de biocombustibles en China”, 2011. p6