

**ESTUDIO DINÁMICO DEL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO AL RECICLAJE
Y REUTILIZACIÓN DE ENVASES PET EN EL VALLE DEL CAUCA**

**MARÍA FERNANDA VALDERRAMA OCORÓ
LUZ ELENA CHAVARRO GÚZMAN**

**MSc JUAN CARLOS OSORIO GÓMEZ
MSc CLAUDIA CECILIA PEÑA MONTOYA
Directores**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Industrial
Santiago de Cali
2014**

**ESTUDIO DINÁMICO DEL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO AL RECICLAJE
Y REUTILIZACIÓN DE ENVASES PET EN EL VALLE DEL CAUCA**

**MARÍA FERNANDA VALDERRAMA OCORÓ
LUZ ELENA CHAVARRO GÚZMAN**

**Trabajo de Grado presentado como
Requisito para optar por el Título de
Ingeniero Industrial**

**MSc. JUAN CARLOS OSORIO GÓMEZ
MSc CLAUDIA CECILIA PEÑA MONTOYA
Directores**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Industrial
Santiago de Cali
2014**

DEDICATORIA

A Dios nuestro señor por habernos acompañado y guiado a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y por habernos permitido vivir esta gran experiencia y llenar nuestras vidas de felicidad.

A nuestros padres, Elena Ocoró, Farid Chavarro y Elena Guzmán, por su incondicional apoyo. Por darnos la oportunidad de tener una excelente educación y por ser grandioso ejemplo de vida.

A nuestros hermanos, Johan y Angélica Chavarro Guzmán, Stefanny, Jhon Jairo y Adelaida Valderrama Ócoró, Alexander Valencia Ocoró y Guillermo Ocoró, por ser una parte muy importante de nuestras vidas y por apoyarnos siempre.

A nuestros amigos, docentes, familiares y compañeros en general, por todas las experiencias maravillosas que compartimos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros directores de tesis

MSc. Juan Carlos Osorio Gómez y MSc Claudia Cecilia Peña Montoya por su paciencia, sus consejos y apreciaciones, elementos indispensables para el desarrollo de este documento.

A la Facultad de Ingeniería

Por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente en sus instalaciones.

A la Escuela de Ingeniería Industrial

Por el apoyo, los compañeros y las gratas experiencias que nos permitieron experimentar.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE GRÁFICOS	IX
GLOSARIO.....	X
RESUMEN	XII
INTRODUCCIÓN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIV
OBJETIVOS	XVII
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 IMPACTO AMBIENTAL.....	18
1.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL (EIA).....	19
1.3 LA DINÁMICA DE SISTEMAS (DS) Y SU APLICACIÓN EN ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL	21
1.3.2 SISTEMA DINÁMICO	23
1.3.3 LÍMITES DEL SISTEMA	23
1.3.4 DIAGRAMAS CAUSALES	23
1.3.5 DIAGRAMAS DE FORRESTER	23
1.4 RECICLAJE EN EL PAIS: PERSPECTIVAS Y ACTUALIDAD.....	24
1.5 CADENA PRODUCTIVA DEL RECICLAJE DEL PLÁSTICO PET	26
1.6 CICLO DE VIDA DEL PET VIRGEN Y RECICLADO	28
1.6.1 ESTUDIOS DE RECICLAJE	30
1.7 REUTILIZACIÓN.....	31
2. MODELACIÓN DEL SISTEMA	32
2.1 DEFINICIÓN DEL NÚCLEO O PROBLEMA A ESTUDIAR.....	32
2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES Y ESTABLECIMIENTO DE SUS RELACIONES.....	33
2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	33
2.2.2 ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES (DIAGRAMA CUASAL)	35
2.3 DIAGRAMA DE FORRESTER	38
2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DEL DIAGRAMA.....	38
2.3.2 SUPUESTO:.....	44
3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	45
3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO	45

3.2	ANÁLISIS DE ESCENARIOS	47
3.2.1	IMPACTOS AMBIENTALES	49
3.2.2	IMPACTO ECONÓMICO	54
3.2.3	IMPACTO SOCIAL:	56
3.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	56
4.	CONCLUSIONES	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disposición final de residuos 2008.....	XV
Figura 2.Ciclo del PET	29
Figura 3.Bucle 1.....	35
Figura 4. Diagrama Causal.....	36
Figura 5.Bucle 2.....	37
Figura 6.Bucle 3.....	37
Figura 7. Diagrama Forrester	39

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de las cantidades de materiales reciclados en Colombia (Ton/año).....	25
Tabla 2. Consumo aparente de PET en Colombia (miles de ton/año)	26
Tabla 3. Impactos del reciclaje y reutilización de PET	34
Tabla 4. Demanda de PET reciclado y PET virgen en el Valle del Cauca entre 2005 y 2010.....	45
Tabla 5. Escenarios de variación de la tasa de reciclaje	47
Tabla 6. Parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad:	56

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Consumo real de PET virgen Vs Consumo de PET virgen simulado....	46
Gráfica 2. Consumo real de PET reciclado Vs Consumo de PET reciclado simulado.....	46
Gráfica 3. Consumo de PET real Vs Consumo de PET simulado.....	47
Gráfica 4. Tasa de reciclaje de PET.....	48
Gráfica 5. Consumo de PET y generación de residuos PET.....	48
Gráfica 6. Variación de las reservas de petróleo por variación de la tasa de reciclaje.....	49
Gráfica 7. Consumo total de agua producción de PET ante variaciones de la tasa de reciclaje.....	50
Gráfica 8. Consumo de energía fabricación de PET variaciones de la tasa de reciclaje.....	51
Gráfica 9. Acumulación de PET en rellenos sanitarios a variaciones de la tasa de reciclaje.....	52
Gráfica 10. Variación de la acumulación de residuos en BCA a diferentes tasa de reciclaje.....	53
Gráfica 11. Acumulación de CO2 en la atmósfera.....	54
Gráfica 12. Variación del consumo de PET reciclado a diferentes tasas de reciclaje.....	54
Gráfica 13. Demanda de PET reciclado Vs Inventario de PET reciclado.....	55
Gráfica 14. Relación entre precios del PET Virgen y Reciclado.....	55
Gráfica 15. Tendencia de la tasa de reciclaje de PET.....	57
Gráfica 16. Consumo total de agua producción de PET ante una tasa de reutilización del 10% y variaciones de la tasa de reciclaje.....	58
Gráfica 17. Consumo total de agua producción de PET ante una tasa de reutilización del 15% y variaciones de la tasa de reciclaje.....	58
Gráfica 18. Acumulación de PET en rellenos sanitarios ante una tasa de reutilización del 15% y variaciones de la tasa de reciclaje.....	59
Gráfica 19. Sensibilidad del consumo de agua fabricación de PET para variaciones de la tasa de reciclaje.....	60
Gráfica 20. Sensibilidad del consumo de energía fabricación de PET para variaciones de la tasa de reciclaje.....	60
Gráfica 21. Sensibilidad de la acumulación de PET en rellenos sanitarios ante variaciones de la tasa de reciclaje.....	61
Gráfica 22. Sensibilidad de la acumulación de PET en botaderos a cielo abierto ante variaciones de la tasa de reciclaje.....	61

GLOSARIO

Estudio de Impactos Ambientales (EsIA): Es un documento técnico de carácter interdisciplinario que está destinado a predecir, identificar, valorar y considerar medidas preventivas o corregir las consecuencias de los efectos ambientales que determinadas acciones antrópicas pueden causar sobre la calidad de vida del hombre y su entorno. [1]

Impacto ambiental: Se entiende por impacto ambiental el efecto que produce una acción sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea base, debido a la acción antrópica o a eventos naturales. [1]

Reciclar: Someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar. En el proceso de reciclado, el material mediante diferentes técnicas como fundición, desintegración o procesos químicos se separa para luego convertirse en un nuevo objeto. [2]

Reutilizar: Es la prolongación de la vida útil de los residuos sólidos recuperados mediante procesos, operaciones o técnicas que les devuelven su posibilidad de utilización en su función original o en alguna relacionada, sin que para ello requieran procesos adicionales de transformación. [2]

Polietileno tereftalato (PET): Poliéster que forma parte de la familia de los plásticos termoformables (o termoplásticos) fácilmente moldeables cuando se le aplica el nivel de temperatura correspondiente. [3]

Sistema: Aspecto de la realidad al que se puede asignar una descripción en la que se describen una serie de elementos y componentes que interactúan entre sí. [4]

Dinámica de Sistemas: Es una metodología de modelado, simulación y análisis de sistemas complejos, formulada inicialmente por Jay Forrester, para entender cómo los sistemas cambian a través del tiempo. Esta metodología usa conceptos del control realimentado para organizar la información en un modelo de simulación por computador, donde se representan las variables del mundo real, la simulación resultante revela implicaciones del comportamiento del sistema representado por él [5].

Botadero a cielo abierto: Sitio donde los residuos sólidos se abandonan sin separación ni tratamiento alguno. Representan un peligro para la salud y la seguridad de los pobladores de las zonas aledañas a estos lugares, quienes en la

mayoría de los casos viven en condiciones infrahumanas sobre los montones de basura o sus alrededores. [6]

Relleno Sanitario: Un relleno sanitario es un lugar destinado a la disposición final de residuos sólidos, en el cual se toman múltiples medidas para reducir los problemas generados por otro método de tratamiento de los residuos, estas medidas comprenden el estudio meticuloso de impacto ambiental, económico y social desde la planeación y elección del lugar hasta la vigilancia y estudio del lugar en toda la vida del relleno sanitario. [7]

RESUMEN

Los sistemas actuales de disposición de residuos sólidos (RS) traen consigo diversos problemas al medio ambiente, por lo que, en la actualidad se están implementando técnicas de tratamiento pos consumo de los RS entre las cuales se destaca el reciclaje y la reutilización.

Dentro del grupo de elementos reciclables y reutilizables contenidos en los RS encontramos los plásticos, materiales que componen alrededor del 14% [8] de los residuos generados en los hogares, y para los cuales las tasas de reciclaje y reutilización en el Valle del Cauca son incipientes respecto al potencial que puede alcanzarse.

En este trabajo de grado se diseña un modelo de dinámica de sistemas, con el cual se dimensiona el impacto ambiental ocasionado por el reciclaje y reutilización de envases PET en el Valle del Cauca con el fin de proveer argumentos en la toma de decisiones sobre la gestión de este tipo de residuos. Para esto se realizó una revisión bibliográfica que permitiera establecer los principales agentes que inciden en el esquema actual de la industria del reciclaje de polietileno tereftalato, la relación existente entre cada uno de estos elementos para finalmente establecer la estructura del sistema.

Una vez se contó con una estructura clara del manejo del PET post-consumo, se utilizó el software de dinámica de sistemas Vensim® para simular el comportamiento del sistema y de los indicadores establecidos, de manera complementaria se realizó un análisis de sensibilidad al modelo para establecer la respuesta del mismo ante cambios, sobre algunos de sus parámetros y componentes críticos.

Al final se realizó la medición de diversos indicadores con los cuáles se evidenciaron los efectos positivos y negativos que tiene el reciclaje de plásticos PET sobre el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental es un proceso que está orientado a resolver, mitigar y/o prevenir los problemas de carácter ambiental, con el propósito de lograr un desarrollo sostenible, entendido éste como aquel que le permite al hombre el desenvolvimiento de sus potencialidades y su patrimonio biofísico y cultural, garantizando su permanencia en el tiempo y en el espacio [5]. Entre las áreas que involucran la gestión ambiental se encuentra *la Evaluación del Impacto Ambiental* definida como un conjunto de acciones que permiten establecer los efectos de proyectos, planes o programas sobre el medio ambiente y elaborar medidas correctivas, compensatorias y protectoras de los potenciales efectos adversos. [9]

En las últimas décadas se ha despertado en la industria el interés por el cuidado, protección y conservación del ambiente, mediante la implementación de prácticas de consumo responsable de los recursos, en este sentido se han iniciado numerosas estrategias que les permitan de manera económicamente viable el manejo de sus productos tanto a nivel interno como en el post-consumo, es en este último punto donde la logística entra a jugar un papel importante, especialmente en el proceso de reintroducción a la cadena de los productos una vez llegan al consumidor final.

La logística reversiva es un elemento de la cadena de suministros que permite la gestión integral de desechos, residuos y desperdicios mal denominados "basura", mediante el análisis del comportamiento de estos una vez han llegado al consumidor final y la manera como pueden ser introducidos nuevamente al proceso productivo. Igualmente se considera como una actividad dentro de la logística directa que permite manejar las devoluciones de productos y los artículos defectuosos dentro de la planta [10].

Este proyecto de investigación se ha propuesto estudiar el sistema de reciclaje y reutilización de las industrias de envases que utilizan el Polietileno Tereftalato (PET) como materia prima, enfocándose principalmente en la manera como estos tratamientos post-consumo inciden en el medio ambiente. Para tal fin, se empleará la dinámica de sistemas como herramienta de análisis para modelar y estudiar el comportamiento de este sistema y su comportamiento a través del tiempo ya que cuenta con retardos y bucles de retroalimentación, que hacen que su aplicación sea efectiva.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actividades y tendencias humanas impactan de forma drástica en el medio ambiente, especialmente cuando se da un consumo y uso descontrolado de productos y recursos, tal es el caso del polietileno tereftalato o como es llamado comúnmente el PET, el cual en la actualidad y como consecuencia de los nuevos estilos de vida, se ha convertido en un material altamente utilizado a nivel mundial, solo en Colombia para el año 2009 se registra un consumo aproximado de 84.000 toneladas al año. [11]

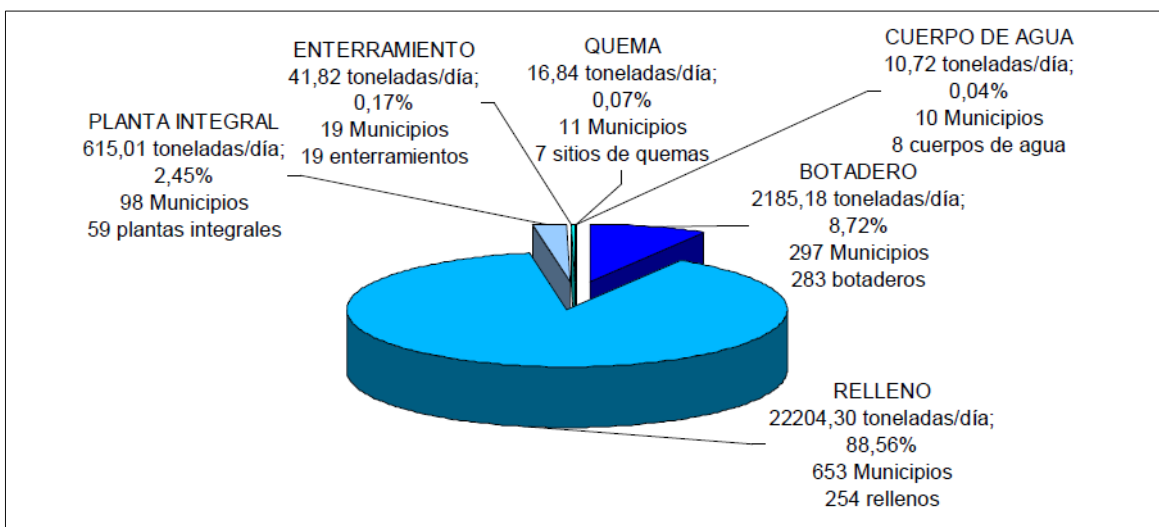
El PET es una de las variedades de plásticos más utilizada para la elaboración de envases de bebidas de consumo masivo, aceites, conservas, cosméticos, detergentes, productos químicos y farmacéuticos, esto se debe a que en el mercado de botellas el PET proporciona varias ventajas, su proceso de fabricación por ejemplo utiliza muy pocos recursos naturales (agua, energía y petróleo); además su propiedad de liviandad supone una reducción en los costos de transporte debido a la disminución del consumo de combustible requerido para esto.

El incremento en el uso de PET está ocasionando efectos ambientales adversos debidos a las actuales formas de disposición de los productos PET una vez son utilizados por el consumidor final. Entre los problemas ambientales ocasionados por el PET se encuentra, mayor acumulación en el medio (períodos de tiempo de 100 a 500 años) debido a la baja degradabilidad que presentan, muerte de animales que quedan atrapados en el interior de botellas cuando son arrojadas a ríos y océanos, inundaciones causadas por el taponamiento de alcantarillas y puntos de desagüe al ser desechados de forma indiscriminada a las calles, disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios debido al volumen que ocupan, cuando son destinados para incineración producen contaminación al aire por la generación de gases de efecto invernadero, afectan la salud humana por la emisión de gases tóxicos y la disposición final de las cenizas contamina el agua subterránea por infiltración de lixiviados. [2]

Aunque el PET es 100% reciclable y fácilmente reprocesable, estas cualidades están lejos de ser consideradas una ventaja, según ACOPLÁSTICOS, solo el 24% [11] del total de plástico consumido en Colombia es reciclado, esto se explica por diversos factores como, la falta de separación en la fuente, la poca rentabilidad que representa para los recolectores la selección de este material y la difícil identificación en los centros de acopio dada la gran variedad de estos que existe en el mercado. A esto se suma la falta de un adecuado sistema de recolección de residuos que permita una pre-selección de los desechos antes de ser llevados a los rellenos sanitarios.

Para contrarrestar la inadecuada disposición de residuos, el gobierno Colombiano en 1997 reglamentó la política integral para el manejo de residuos sólidos, el decreto 2981 de 2013, la resolución 1045 de 2003 y otra serie de disposiciones para impulsar prácticas de consumo sostenible y manejo adecuado de los residuos; sin embargo, estos mecanismos legales se han quedado cortos y de acuerdo con el informe de disposición final de los residuos (versión 2008), emitido por el MAVDT¹, los rellenos sanitarios y los botaderos a cielo abierto son los sitios de disposición final “preferidos” en el territorio nacional (Ver Figura 1) .

Figura 1. Disposición final de residuos 2008.



Fuente: SUI – SSPD [2]

En el Valle del Cauca también se replica la tendencia nacional, aquí, el 92,8% y el 6,1% de todos los residuos son dispuestos en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto respectivamente. El bajo porcentaje de aprovechamiento de residuos ha obligado al gobierno vallecaucano al cierre anticipado de sus centros de disposición final y recurrir a rellenos sanitarios en otras regiones del país para el manejo de sus residuos.

En lo que concierne a los plásticos, en el Valle del Cauca se producen alrededor de 84,18 toneladas diarias de los cuales solo es aprovechado alrededor del 10 % [8], de acuerdo con el plan integral de residuos 2004-2019, este bajo porcentaje se debe a la poca cultura ciudadana respecto a la reducción, reutilización y reciclaje de productos, la inadecuada forma de disposición de las “basuras” y la inexistencia de un adecuado sistema de valorización de los residuos siendo este el principal problema ya que el mercado de reciclables es uno de los más monopolizados dentro de la industria, a esto se le suman las precarias condiciones laborales de

¹ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

los recicladores y el poco atractivo que representa para ellos el reciclar una botella plástica debido a su bajo costo respecto a otros materiales como el papel, el vidrio o la chatarra.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué efectos medioambientales podría tener un aumento en el reúso y reciclaje de plástico PET en Valle del Cauca?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto ambiental asociado al reciclaje y reutilización de envases PET en el Valle del Cauca, a partir de la aplicación de un modelo de dinámica sistemas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los indicadores ambientales aplicables a la investigación teniendo como base estudios ambientales.
- Seleccionar los elementos del proceso de reciclaje y reutilización que harán parte del sistema, mediante la exclusión de aquellos que no inciden de manera contundente en los indicadores ambientales.
- Diseñar un modelo de dinámica de sistemas que permita establecer el impacto del reciclaje de los plásticos por medio de la definición de las relaciones entre los elementos que hacen parte del estudio.

1. MARCO TEÓRICO

Con el fin de acercar al lector a los conceptos manejados durante el desarrollo del documento a continuación se presentan algunas definiciones sobre estos temas:

1.1 IMPACTO AMBIENTAL

Sánchez, define el impacto ambiental como la *“Alteración de la calidad ambiental que resulta de la modificación de los procesos naturales o sociales provocada por la acción humana”*. [12]

Wather extiende más el concepto contextualizando en tiempo y espacio al definirlo como *“el cambio en un parámetro ambiental, en un determinado período y en una determinada área, que resulta de una actividad dada, comparado con la situación que ocurriría si esa actividad no hubiera sido iniciada”*. [13]

De acuerdo con estos dos autores, puede decirse que un impacto ambiental es el cambio que se ocasiona sobre una condición o característica del ambiente por efecto de un proyecto, obra o actividad el cual puede ser benéfico o perjudicial, producirse en cualquier etapa del ciclo de vida de los proyectos y tener diferentes niveles de significancia.

Para la estimación de los impactos ambientales causados por un proyecto obra o actividad a nivel global se utilizan diversos indicadores cuya aplicabilidad depende del tipo, área de influencia y tamaño de este; sin embargo, deben considerarse tres grupos de indicadores para establecer los impactos del proyecto, los cuales se agrupan en: [14]

- Indicadores de impacto al medio ambiente: Permiten calcular los impactos del proyecto al medio biótico y abiótico de su área de influencia y están asociados directamente al uso y agotamiento de los recursos naturales, efectos sobre el recurso geológico y afectación a la fauna y flora.
- Indicadores de impacto sociocultural: Permiten conocer las principales características de la población de la zona de influencia del proyecto y su relación con el mismo, están ligados a efectos en las costumbres, estilos de vida, salud y entorno de las poblaciones.
- Indicadores de impacto económico: Buscan identificar y estimar el valor económico de los impactos ambientales de tal manera que estos puedan incluirse dentro del análisis de evaluación económica ambiental del proyecto y contribuir en la determinación de la viabilidad del mismo.

1.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL (EIA)

La evaluación del impacto ambiental en los últimos años a nivel mundial, se ha constituido como la principal herramienta para la toma de decisiones sobre proyectos con alto impacto ambiental. Colombia ha asumido su uso en términos sociales y legales con el mismo objetivo, sin embargo la eficiencia de su aplicación no ha cumplido con las expectativas de las autoridades ambientales nacionales debido principalmente a los bajos controles que se ejercen a los planes de manejo ambiental, una vez se le otorga la licencia ambiental al proyecto². [15]

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) la evaluación del impacto ambiental es una herramienta de decisión empleada para identificar y evaluar las probables consecuencias ambientales de determinadas acciones en el desarrollo de proyectos con el fin de diseñar e incorporar medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo de los efectos de estas sobre el medio ambiente. [16]

D. Gómez lleva este concepto un poco más lejos y no lo limita a la ejecución de proyectos en el sentido estricto de la palabra, sino que lo asocia al análisis de los probables resultados o efectos que las acciones del hombre sin limitar su magnitud pueden ejercer cambios en el medio ambiente y la prospección de mecanismos para evitarlos, reducirlos a niveles aceptables o compensarlos [4].

Estos conceptos muestran como la EIA no sólo se utiliza para determinar una condición futura probable, sino además para definir en el presente acciones que permitan afrontar los impactos de una manera sostenible, mediante una adecuada planificación. Una planificación resulta efectiva, si se logra una acertada identificación de impactos, en la cual se tenga en cuenta los diferentes marcos en los que se desarrolla el proyecto o actividad. En Colombia, el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, en busca de unificar y asegurar la adecuada realización de los EIA definió los temas que este debe contener y en el 2010 diseñó la "Metodología para la presentación de estudios de impactos ambientales", la cual se enfoca en analizar principalmente tres marcos de referencia, el ambiental, el social y el económico, ya que estos permiten tener un mayor acercamiento al contexto de la situación a evaluar, y se identifica de forma

² De acuerdo al Art. 3 del Decreto 2820, la Licencia Ambiental, es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta al beneficiario de ésta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada.

adecuada los impactos generados por la actividad y las actividades necesarias para el control, mitigación o eliminación de los mismos.

Para la evaluación del impacto ambiental se deben identificar, describir y evaluar los posibles impactos sobre los medios abiótico, biótico y socioeconómico, que puedan originar las actividades relacionadas con el proyecto en estudio. Esta se debe realizar incluyendo la identificación e interpretación de las interacciones de las actividades de la región con el medio ambiente existente y de las interacciones de las actividades del proyecto con el mismo. [17]

La evaluación debe considerar especialmente los impactos residuales, acumulativos y sinérgicos de carácter positivo o negativo producto del desarrollo de otros proyectos en el área de influencia. Para desarrollar la evaluación ambiental con y sin proyecto se debe tener en cuenta: [17]

- Análisis de los impactos previos al proyecto, identificando las actividades que más han ocasionado cambios en el entorno ambiental y socioeconómico de la zona de estudio y realizar el análisis de tendencias.
- Análisis del proyecto en sus aspectos técnicos identificando las actividades impactantes en las diferentes etapas del mismo.
- Identificación y calificación de impactos esperados por la realización de las diferentes actividades del proyecto.

Dentro de la legislación Colombiana los estudios de impacto ambiental deben contener [18]:

- a. Objeto y alcance del estudio.
- b. Resumen ejecutivo de su contenido.
- c. Delimitación del área de influencia directa o indirecta del proyecto.
- d. Descripción del proyecto, obra o actividad.
- e. Compatibilidad del proyecto con los usos de suelo establecidos en el POT.
- f. La información sobre los recursos naturales renovables que se pretenden usar, aprovechar o afectar para el desarrollo del proyecto, obra o actividad.
- g. Identificación de las comunidades y de los mecanismos utilizados para informarles sobre el proyecto, obra o actividad.
- h. La descripción, caracterización y análisis del medio biótico, abiótico, socioeconómico en el cual se pretende desarrollar el proyecto, obra o actividad.
- i. La identificación y evaluación de los impactos ambientales que puedan ocasionar el proyecto, obra o actividad, indicando cuáles pueden prevenirse, mitigarse, corregirse o compensarse.
- j. Un plan de manejo ambiental.

Sin embargo, a nivel mundial se han desarrollado diversas metodologías para los EIA, cuya efectividad depende del grado en que se pueda llegar a un análisis donde se definan claramente y de forma sistémica, la relación causa efecto, identificando las acciones que toma el hombre y su impacto directo o indirecto sobre el medio. Es por tanto que herramientas como la dinámica de sistemas son aplicables a este tipo de estudios pues permiten representar el comportamiento retroalimentativo de un sistema y concluir sobre este.

1.3 LA DINÁMICA DE SISTEMAS (DS) Y SU APLICACIÓN EN ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL

La dinámica de sistemas (DS) es una herramienta que en sus inicios se desarrolló para dar soluciones a problemas industriales, Forrester, pionero en el tema la define como el *“estudio de las características de retroalimentación de la información en la actividad industrial con el fin de demostrar cómo la estructura organizativa, la ampliación de políticas y las demoras en las decisiones y acciones interactúan e influyen en el éxito de la empresa”* [19].

Sin embargo su versatilidad y potencialidad para el análisis de diversos sistemas han hecho que la DS incursione con gran éxito en otros ámbitos. La dinámica de sistemas se puede entender como un modelo matemático que permite simplificar el análisis de sistemas complejos, a través de la construcción de modelos de simulación basados en el entendimiento de la estructura causal que provoca el comportamiento del sistema estudio, lo cual implica conocer los elementos que conforman dicho sistema y definir claramente el papel de estos dentro del mismo, permitiendo así observar como diferentes acciones acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento implícitas en el sistema.

Uno de las áreas en las que la DS ha incursionado fuertemente en los últimos años es la medioambiental, ya que son diversos los problemas en este campo que han sido abordados desde el enfoque sistémico. Algunos estudios claves en los cuales se basó este estudio son:

L. Rodríguez., et al utilizan la dinámica de sistemas para simular la situación actual del sistema de gestión de residuos eléctricos y electrónicos específicamente el caso de los televisores en la ciudad de Bogotá, Colombia. [20]

O. Vásquez en su artículo presenta un modelo que permite simular el impacto de un plan de gestión de para el manejo de los residuos sólidos domiciliarios en la región metropolitana de Chile integrando los diversos componentes, tales como: población, condición socioeconómica, recolección de residuos, vertederos ilegales de residuos, estaciones de transferencias y rellenos sanitarios. [21]

M. Sufian y B. Balab utilizan un modelo dinámico para predecir la generación, capacidad de recolección y cantidad de energía que se puede obtener de los residuos sólidos sometidos a incineración, además evaluar las políticas públicas para mejorar la gestión de residuos en la ciudad de Dhaka. [22]

B. Dyson y N. Chan en su publicación usan la dinámica de sistemas para predecir la cantidad de residuos sólidos que se generarían en una región determinada de forma que se pueda planificar y diseñar un sistema de gestión de residuos eficiente. [23]

N. Kollikkathara, et al, por medio de la dinámica de sistemas evalúan la generación, capacidad de almacenamiento de los rellenos sanitarios, el costo-beneficio y el impacto de las opciones de tratamiento de los residuos sólidos urbanos. [24]

S. Cloetingh, plantea un modelo dinámico que intenta pronosticar el comportamiento de los sistemas geológicos e hídricos actuales y futuros, de forma que se pueda realizar una adecuada planificación, tomar medidas preventivas ante los posibles desastres naturales y las variaciones geológicas. [25]

G. Ye, et al, diseñan un modelo dinámico para evaluar el desempeño ambiental de la gestión de los residuos de construcción en China, que permitiera analizar la relación costo beneficio del manejo de este tipo de materiales y valorar los efectos de la implementación de diferentes políticas y mecanismos de gestión. [26]

1.3.1 METODOLOGÍA Y CONCEPTOS UTILIZADOS EN LA DINÁMICA DE SISTEMAS:

La DS suministra un lenguaje que permite expresar las relaciones que se producen en el seno de un sistema y explicar cómo se genera su comportamiento. De acuerdo con Aracil y Gordillo, para la ejecución de una simulación mediante la dinámica de sistemas se deben desarrollar las siguientes etapas: [27]

- **Definición del núcleo o problema a estudiar:** Se debe definir y delimitar de forma clara y precisa el problema o sistema que se desea modelar.
- **Identificación de variables y establecer sus relaciones:** Solo se deben tomar en cuenta aquellas variables involucradas en el problema a estudiar, limitando el sistema a un modelo simplificado con comportamientos y resultados similares al modelo real.
- **Construcción y simulación del modelo:** Se debe establecer un diagrama de forrester, que concibe el sistema en un diagrama de flujos el cual permite adaptarlo a un software de simulación.

- **Interpretación de resultados:** Los resultados deben ser analizados identificando ciertos comportamientos de interés, aquí se puede modificar el modelo para generar escenarios alternativos, visualizando mediante la simulación, las consecuencias en el sistema a través de los nuevos resultados arrojados.

1.3.2 SISTEMA DINÁMICO

Los modelos en dinámica de sistemas están conformados por relaciones entre flujos de material, flujos de información, representaciones de los procesos en la toma de decisiones y la forma como estos se retroalimentan, en este sentido un sistema dinámico es un conjunto de elementos que presenta cambios o evolucionan a lo largo del tiempo, además está conformado por:

- Un conjunto de elementos en interacción o no, dependiendo de si es complejo o no.
- Diagramas causales en los que se puede mostrar su comportamiento.
- Variables endógenas (provocadas por el propio sistema) o exógenas (afectan al sistema sin que este las provoque)

1.3.3 LÍMITES DEL SISTEMA

Están dados a partir de la delimitación de los elementos que conforman el sistema y los que no, es importante tener claro este aspecto ya que permitirá realizar una mejor aproximación al sistema real que se quiere estudiar.

1.3.4 DIAGRAMAS CAUSALES

Son ilustraciones que permiten evidenciar las relaciones causa efecto y los cambios ocasionados por una variable A en una B o viceversa, en este aparecen formalizados los elementos del sistema y se establecen las relaciones entre ellos, haciendo constar cuál es el signo de variación esperado entre cada par de elementos.

1.3.5 DIAGRAMAS DE FORRESTER

Los diagramas de Forrester son una traducción del diagrama causal que permite adaptar el modelo dinámico al lenguaje de programación para así validarlo, observar la evolución temporal de las variables y realizar análisis de sensibilidad. Los diagramas de Forrester están compuestos por los siguientes elementos: [28]

- **Variables de nivel o de estado:** Permiten ver el comportamiento del modelo en cada instante de tiempo, las variables de estado cambian en función de los flujos y en ocasiones por variables auxiliares. Cabe

mencionar que la elección de estas depende del sistema que se esté modelando y de la experiencia del diseñador. [28]

- **Variables de flujo:** Definen el comportamiento del sistema, ya que determinan la velocidad del flujo de acuerdo con un conjunto de ecuaciones asociadas, las cuales dependen de la información que las válvulas reciben del sistema y del entorno. [28]
- **Variables auxiliares:** Se introducen al modelo para dar mayor claridad a los pasos que se llevan a cabo para hacer los cálculos que dan como resultado cambios a las variables de nivel o porque tienen cierto significado o interpretación física que puede ser interesante observar. [28]

1.4 RECICLAJE EN EL PAIS: PERSPECTIVAS Y ACTUALIDAD

El reciclaje se define como el proceso al cual se somete un material usado para que se pueda volver a utilizar. En el proceso de reciclado, el material mediante diferentes técnicas como fundición, desintegración o procesos químicos se separa para luego convertirse en un nuevo objeto. [2]

El reciclaje enmarcado como cadena de valor se genera por razones económicas como una oportunidad para diversos actores: Están las empresas interesadas en reducir costos de adquisición de materia prima, los comerciantes e intermediarios que adquieren bodegas y compran los materiales y en tercer lugar las personas u organizaciones que recuperan directamente los materiales aprovechables de fuentes y sitios de disposición. [29]

En la actualidad la cadena de reciclaje presenta buenas perspectivas en términos de su desarrollo sin embargo debe afrontar varios inconvenientes, el primero de ellos está asociado a que gran cantidad de los materiales que pueden ser aprovechados son dispuestos en botaderos o rellenos sanitarios. El segundo tiene que ver con la competencia intensa y los bajos precios para el eslabón de recicladores, lo cual afecta el interés de estos en recolectar materiales pos-consumo a lo que se suma la migración de los sistemas de aseo hacia un enfoque privado lo cual podría excluir al eslabón de recicladores [30]. En la Tabla 1, se observa la estimación de las cantidades de residuos sólidos reciclados en Colombia.

Tabla 1. Estimación de las cantidades de materiales reciclados en Colombia (Ton/año)

Año	Vidrio (1)	%	Cartón y papel (2)	%	Chatarra (3)	%	Plásticos (4)	%	Total
2005	82.521	5.34	541.800	35.04	753.129	48.7	169.000	10.93	1'546.450
2006	76.963	4.64	581.300	35.03	813.481	49.02	187.750	11.31	1'659.494
2007	75.549	4.25	608.200	34.25	885.402	49.86	205.500	11.63	1'775.651
2008	85.420	4.63	645.200	34.98	913.634	49.54	200.000	10.84	1'844.254
2009	70.301	3.91	632.800	35.23	892.743	49.70	200.500	11.16	1'796.344
2010	76.825	4.09	658.238	35.01	935.300	49.75	209.655	11.15	1'880.018

Fuente: Caracterización de los eslabones del reciclaje Julio 2011.

La recuperación se realiza de tres formas 1) Recuperación por recicladores en espacio público 2) Recuperación por recicladores en lugares autorizados de los rellenos sanitarios y 3) Recuperación en la fuente, donde no solamente lo realizan los recicladores sino además la gran industria la cual desarrolla canales de comercialización directa con grandes generadores industriales.

Como se observa en los registros de la tabla 1 los productos reciclados crecen a una tasa de 61.343 ton/año, lo que evidencia un dinamismo en los procesos de recuperación. Según Marta Corredor consultora en el tema ambiental esto se debe a: [29]

- Aumento de la demanda de materiales recuperados, por a) aumento del potencial de los residuos que pueden ingresar a nuevos procesos productivos; b) aumento de la capacidad instalada de la industria de absorber un alto porcentaje de estos materiales y; c) la promoción de la exportación y desarrollo de nuevos productos en el sector de las pequeñas y medianas empresas que requieren materia prima recuperada.
- Promoción del reciclaje a través de políticas y normas relacionadas con aspectos ambientales, el manejo integral de residuos sólidos y la prestación de servicio de aseo, lo que ha llevado a la inversión de recursos orientados principalmente a la promoción de la separación en la fuente, la organización y capacitación de los recicladores.
- La crisis económica del país ha llevado a que, no solo la población de más bajos ingresos de la ciudad o desplazados ingresen a desarrollar esta actividad, sino profesionales o capitalistas que encontraron en el reciclaje una alternativa económica.

1.5 CADENA PRODUCTIVA DEL RECICLAJE DEL PLÁSTICO PET

La cadena productiva de los plásticos es una de las más dinámicas, creciendo a tasas superiores del 7% anual. Hoy en día es difícil imaginar un producto en el cual alguno de sus componentes no sea plástico, debido a las ventajas que este material ofrece no solo a los consumidores sino también a los productores.

Entre una de las resinas con mayor demanda se encuentra el PET el cual es aprovechado para fabricar envases, películas, termoformados y fibras textiles.

El consumo global del PET se calcula en 12 millones de toneladas al año con un crecimiento anual de 6% [31].

Tabla 2. Consumo aparente de PET en Colombia (miles de ton/año)

RESINA	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Resinas PET para envases y láminas	20	30	38	46	54	58	70

Fuente: ACOPLÁSTICOS, Plásticos en Colombia 2011

Este material es 100% reciclable, lo cual hace que la recuperación de este material se esté convirtiendo en una de las mayores oportunidades de negocios para toda la industria del plástico.

La cadena productiva está comprendida básicamente por las siguientes etapas: generación, recuperación de materiales, recolección y transporte, almacenamiento, pre-transformación, transformación y comercialización de las materias primas recuperadas. [32]

En la **generación** se pueden distinguir tres tipos de generadores: domiciliarios, instituciones y empresarios. Uno de los mayores generadores está en la industria de envases PET, con un ciclo de vida muy corto y con un crecimiento en la demanda del 9% anual, este es uno de los que más debe centrarse la industria del reciclaje si bien entre sus objetivos está el mejoramiento de la calidad ambiental.

La **recuperación** de la resina PET enfrenta problemas, debidos a la amplia gama de resinas plásticas que existen en el mercado, lo que dificulta su identificación y clasificación por lo que organizaciones como ACOPLÁSTICOS vienen adelantando acciones de capacitación

Cabe destacar la influencia que tiene también el estado en esta etapa. En Colombia antes de 1997 se consideraba a los plásticos como materiales no

aprovechables que se disponen en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto, [33] sin embargo con la creación de la política pública para el manejo de residuos se han tomado medidas para reglamentar su aprovechamiento y valorización, a pesar de esto aún se deben afrontar varios retos antes de aseverar que se cuenta con un adecuado sistema de manejo de residuos sólidos. La procedencia dominante del plástico de los residuos ordinarios residenciales y la naturaleza informal de la mayoría de agentes que lo seleccionan hace que este material no tenga la calidad requerida y se pierda buena parte de su potencial.

La **pre-transformación** se realiza en mayor medida de forma mecánica. Cabe mencionar que no todo el PET puede ser sometido a reciclaje mecánico debido a que en algunos casos este ha sido contaminado con sustancias químicas orgánicas, inorgánicas o tóxicas, tienen un alto grado de deterioro en sus propiedades mecánicas o fue mezclado con otros polímeros. En estas circunstancias se exploran otras alternativas como el reciclaje químico o el aprovechamiento energético por medio de la incineración.

En lo referente a la **Transformación**, como se mencionó anteriormente los envases PET son recuperados en mayor medida de forma mecánica, destinados principalmente a la producción de fibras finas para tejidos, fibras gruesas para materiales aislantes y empaques para productos no alimenticios, en menor proporción se utilizan para la fabricación de envases grado alimenticio debido a las características de conservación que se requieren para este tipo de usos. En Cali se localizan una serie de empresa dedicadas a la transformación del PET; este material da la posibilidad de generar negocios con unas inversiones relativamente bajas. [34]

A nivel nacional el mercado del plástico reciclado es el más complejo y del que menos información disponible existe porque la demanda de este material está dispersa y fundamentalmente atiende a los micros y pequeñas empresas. La **Comercialización** enfrenta desafíos, en cuanto a la volatilidad de los precios, lo cual junto con la percepción de los consumidores frente a productos elaborados con materiales reciclados, influye drásticamente en la demanda de resina reciclada.

Así mismo, está el hecho de que algunos sectores de mercado presentan resistencia hacia el uso de materiales reciclados en algunos productos. No obstante, el panorama es muy positivo. *“Cada año se ve más el incremento del uso del PET reciclado para varios productos en América Latina. Muchas compañías en varios países están invirtiendo en maquinaria y tecnología para dar uso al PET reciclado”*. [31]

En el tema de aplicaciones de PET reciclado para grado alimenticio, las especificaciones que se requieren por parte de los grandes embotelladores internacionales son muy estrictas, y esto no se puede hacer sin tener una

inversión significativa, con tecnología de punta. El beneficio que se tiene que buscar es ser competitivo con la resina virgen y estar cuando menos a la par. En ese caso, el compromiso ambiental y la motivación ecológica serán los que determinen la toma de decisiones, y no únicamente el aspecto económico”, comentó el Ing. Jaime Cámara, director general de PetStar, S.A. de C.V., la mayor planta de reciclaje botella a botella de México. [34]

Lo cierto es que con el factor ambiental sobre la mesa, los desafíos del reciclaje de PET tienden a convertirse en oportunidades. Por ejemplo, bajo esta mirada el precio no sería el único diferenciador entre un producto terminado fabricado con resina virgen o con resina recuperada. “No existe ningún parámetro que nos diga que el precio de la resina reciclada deba de ser menor que el de la resina virgen. [35]

En este sentido, la cantidad de envases disponibles para reciclaje dependen del incremento en su uso por parte de la industria, la adecuada separación de los residuos sólidos en los hogares, la recolección selectiva por parte de las empresas de aseo, la inversión en políticas públicas para el manejo de los residuos sólidos y el reconocimiento del PET reciclado por parte del mercado como un material con características equivalentes a las del material virgen.

1.6 CICLO DE VIDA DEL PET VIRGEN Y RECICLADO

La Figura 2, muestra el proceso para la obtención de PET, el cual inicia con la extracción del petróleo del cual se obtienen sus principales constituyentes, un kilogramo de PET es 64% [2] de petróleo, lo que implica un impacto ambiental por el uso un recurso no renovable. Después, es sometido a un proceso de polimerización del cual se obtiene la resina, para posteriormente someterla a procesos de extrusión, soplado o inyección y obtener los envases que son empleados por las industrias para empacar sus productos (transformación).

Los envases PET una vez son utilizados por el consumidor final, tienen cinco alternativas de disposición:

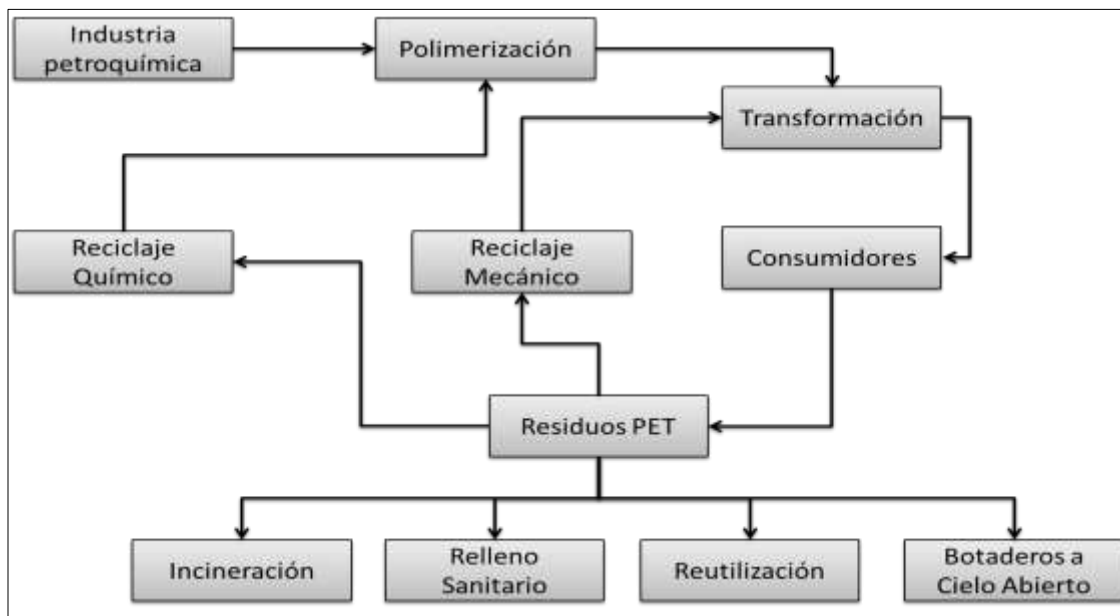
- El relleno sanitario sitio al cual se envía normalmente los residuos generados por los hogares y la industria.
- Los botaderos a cielo abierto lugares inapropiados donde algunas comunidades arrojan sus residuos.
- La incineración, alternativa de aprovechamiento del PET mediante la generación de energía gracias al poder calorífico de este.
- La reutilización la cual consiste en la prolongación del ciclo de vida del PET por parte del consumidor final.
- El reciclaje, el cual puede ser químico o mecánico, ambos métodos permiten utilizar el material post-consumo para obtener nuevamente resina

ya sea para la producción de nuevos envases u otro tipo de productos de menor valor agregado.

El reciclaje mecánico o primario consiste en cortar las piezas de plástico en pequeños granos para posteriormente tratarlos. Los plásticos también se pueden reciclar por procesos químicos reduciéndose a componentes sencillos que pueden ser utilizados como materias primas para obtener aceites, grasas o monómeros. El reciclaje químico puede efectuarse por pirolisis, hidrogenación, gasificación y tratamiento con disolventes, por último el reciclaje terciario se utiliza para obtener un producto con características inferiores a la del material original debido a la mezcla de diferentes termoplástico los cuales se muelen y funden en un extrusor. [33].

El PET post-consumo para su reciclado es seleccionado, clasificado y acopiado por recicladores o en estaciones de transferencia de donde se envía a empresas³ o plantas de reciclaje⁴. Una vez aquí es sometido a procesos de lavado, triturado, secado y procesos de inyección para obtener nuevamente resina o preformas, las cuales pueden utilizarse para la producción de nuevos envases, la elaboración de fibra textil, alfombras, madera plástica etc.

Figura 2.Ciclo del PET



Fuente: Los autores

³ Empresas que compran plástico post-consumo para la producción de nuevos envases u otros productos

⁴ Empresas que se dedican a vender el plástico reciclado triturado como materia prima para otras.

1.6.1 ESTUDIOS DE RECICLAJE

A nivel mundial existen numerosos estudios donde se evalúa la factibilidad del reciclaje de los plásticos y sus principales barreras para convertirse en una práctica ampliamente realizable, entre ellos se pueden destacar:

El estudio realizado por el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS), en el cual se realiza un análisis sobre las limitaciones y oportunidades que presenta el uso de PET reciclado para la fabricación de envases en contacto con alimentos, establece la legislación bajo la cual se realizan este tipo de procedimientos y se realiza una comparación entre la situación actual de España frente a este tema en comparación con otros países de Europa y Latinoamérica. [30]

El artículo de Arandés, Bilbao y López en el que se analizan las principales causas por las que el reciclaje de plásticos es relativamente bajo en comparación con sus niveles de producción y los beneficios que su reutilización y reciclaje representaría no sólo a nivel medioambiental sino también a nivel industrial. [3]

El documento realizado por el Plastic Waste Management Institute (PWMI), acerca de la problemática ambiental generada por el incremento en la producción y uso de envases plásticos en las industrias a nivel mundial y las medidas implementadas en Japón para tratar de mitigar los impactos generados por dicho aumento. [36]

El estudio realizado en Australia por Fletter y Mackay de la universidad de Queensland, en el cual se desarrolló un modelo que analiza básicamente dos grandes formas de reciclaje de plástico, una en donde el plástico reciclado se utiliza en reemplazo del plástico virgen y otra en donde el plástico reciclado ingresa a un nuevo mercado, así como su impacto en la generación de residuos. [37]

El artículo de Karayannidis, y Achilias, en el cual se presentan cuatro métodos utilizados para el reciclaje químico de PET, con el fin de descomponer los envases y obtener monómeros de ácido tereftálico de manera que estos se puedan utilizar para la fabricación de nuevos polímeros. [38]

El artículo de Nikles, y Farahat, quienes plantean algunos de los beneficios asociados al reciclaje del PET para la fabricación de productos y/o materiales con mayor valor agregado y con características equivalentes a la de materiales vírgenes. [39]

Ariosti, et al, consolidaron la información sobre el procesamiento de PET reciclado para contacto con alimentos con el fin de generar la legislación de MERCOSUR necesaria para la autorización del uso de las botellas recicladas monocapa fabricadas con PET-PCR descontaminado. [35]

Córdoba; et al, en su estudio plantean el uso de plástico reciclado reforzado con TETERA para la obtención de un material sustituto de la madera para la fabricación de muebles domiciliarios, industriales y en la construcción de viviendas de interés social.

1.7 REUTILIZACIÓN

En Colombia la resolución 4143 de 2012 en el artículo 14 estipula que *“Salvo en los casos que la autoridad sanitaria nacional lo autorice, se prohíbe reusar envases plásticos para el contacto con alimentos y bebidas del mismo o distinto tipo que los originales”*.

Sin embargo, existen otros documentos jurídicos que avalan la reutilización de envases plásticos para contacto con alimentos siempre y cuando se garanticen las condiciones de inocuidad de los empaques, entre dichos documentos se encuentran:

La resolución 683 de 2012 en el artículo 7, establece que *“La reutilización de envases de vidrio o plástico se permitirá únicamente si se cuenta con tecnologías de retorno de envases, que incluyan la logística de recuperación de estos, la detección de contaminantes presentes, su limpieza e higienización, así como la evaluación de su aptitud sanitaria e inocuidad”*

La ley 09 de 1997 en el artículo 269 estipula que *“La reutilización de envases o empaques que no hayan sido utilizados para almacenar sustancias peligrosas, se permitirá únicamente cuando estos envases o empaques no ofrezcan peligro de contaminación para los alimentos o bebidas, una vez lavados, desinfectados y esterilizados”* [40]

El decreto 3075 de 1997 en el capítulo IV artículo 18 expresa claramente que *“los envases y recipientes utilizados para manipular la materia prima y los productos terminados deben estar fabricados con materiales apropiados para su contacto con el alimento y cumplir con todas las reglamentaciones relacionadas a las entidades de vigilancia y control referentes a los grados de toxicidad tolerables y no tolerables, pureza y demás variables al uso intencionado”* [41]

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, si se logra garantizar las condiciones de inocuidad del material plástico, la reutilización de envases estaría permitida; sin embargo, dentro de la investigación realizada, en el Valle del Cauca no se encontraron empresas que realicen esta actividad.

2. MODELACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se desarrolla tres de las 4 etapas contempladas por Aracil y Gordillo [42] para la realización de un estudio dinámico:

- Definición del núcleo o problema a estudiar
- Identificación de variables y establecimientos de sus relaciones
- Construcción y simulación del modelo:

2.1 DEFINICIÓN DEL NÚCLEO O PROBLEMA A ESTUDIAR

El sistema comprende desde la extracción del petróleo para conseguir resina de PET virgen, se extiende a su fabricación, disposición final y reciclaje. La industria en la que se enfoca el estudio comprende los procesos de separación, selección, acopio, distribución procesamiento y comercialización de polietileno tereftalato tanto en su forma primaria como en productos terminados. Dentro de los agentes que conforman este sistema se derivan una serie de elementos interrelacionados cuyo comportamiento es de vital análisis pues reflejan de alguna forma la problemática planteada.

En concordancia con los temas definidos por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, para estudios de EIA, se incluirán dentro de las variables a estudiar aquellas que muestran impactos sobre los marco social, ambiental y económico, entendiendo estos como:

Marco social: Se centra en las acciones que pueda o no tomar la población frente a la percepción de una problemática ambiental que afecta su región, debido a prácticas no sostenibles, generación de empleo y mejoramiento o desmejoramiento de calidad de vida.

Marco ambiental: Contempla los efectos en el medio ambiente, consecuencia de la inadecuada disposición del PET, así como los generados por las actividades propias de la producción con materia prima virgen y reciclada.

Marco económico: Se enfoca en las posibles inversiones tanto del sector privado como del público en lo referente a mejoras del sistema de recolección de residuos o la creación de uno nuevo, así como de los impactos que tienen estas en el desarrollo de la economía del departamento por la creación de empleos directos e indirectos.

Para la evaluación del impacto del reciclaje y reutilización de impacto ambiental se realizará el análisis comparativo de los siguientes puntos:

- Consumo de agua por fabricación de PET reciclado Vs Consumo de agua producción de PET virgen.

- Consumo de energía por fabricación de PET reciclado Vs Consumo de energía producción de PET virgen.
- Disminución de las reservas de petróleo por uso de material PET virgen.
- Acumulación de PET en rellenos sanitarios
- Acumulación de PET en Botaderos a Cielo abierto.
- Acumulación de CO₂ en la atmosfera.
- Efectos del precio en las tasa de reciclaje.
- Inversión pública y/o privada en el manejo de residuos
- Efectos en la población por prácticas de manejo de residuos inadecuadas
- Efecto de la variabilidad del precio del material reciclado en la tasa de reciclaje.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES Y ESTABLECIMIENTO DE SUS RELACIONES

Esta parte consta de dos etapas:

- Identificación de variables
- Establecimiento de relaciones por medio de la construcción del modelo cualitativo o causal.

2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Con el fin de analizar los impactos ambientales asociados al reciclaje y reutilización de PET en el Valle del Cauca se realiza el mapeo de la cadena de valor identificando en ella las variables a incluir en el modelo, en relación con los marcos a estudiar.

En la tabla 3 se identifican las variables en las que la actividad de reciclaje incide de manera directa, a partir de las cuales se miden los impactos en los tres marcos objeto de estudio. La información recopilada en esta se basa en la bibliografía consultada y el análisis del entorno realizado por los autores de este documento.

Tabla 3. Impactos del reciclaje y reutilización de PET

Alternativa	Impacto ambiental	Impactos económicos y socio-culturales
Reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del volumen y cantidad de residuos en vertederos y rellenos sanitarios. • Menor consumo de materia prima virgen producto del uso de materiales reciclables en la industria. • Disminución del uso de energía en la transformación de los productos. • Menor contaminación de los suelos. • Consumo de agua y contaminación de fuentes hídricas por procesos de enjuague y lavado de material. • Emisión de gases de efecto invernadero asociadas a los procesos de transformación de los residuos en materia prima. • Disminución de lixiviados generados en el relleno sanitario por sudoración y acumulación de líquidos en los envases PET. • Consumo de energía eléctrica para el reciclaje mecánico y químico. • Disminución de CO₂ en la atmosfera por incineración de residuos 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de ingresos para familias que se dedican a la labor de acopio de materiales reciclables. • Disminución del gasto social y público producto del manejo de desecho. • Disminución del gasto social producto de la atención a las personas expuestas y afectadas por la contaminación y deterioro del ecosistema. • Afectación a la salud de las personas dedicadas al reciclaje por inadecuadas condiciones de trabajo. • Disminución de las modificaciones paisajísticas como consecuencia del desecho de residuos botaderos a cielo abierto. • Economía de escala en la elaboración de productos por reducción de costo de industrialización.

Fuente: Los autores basados en información secundaria recolectada

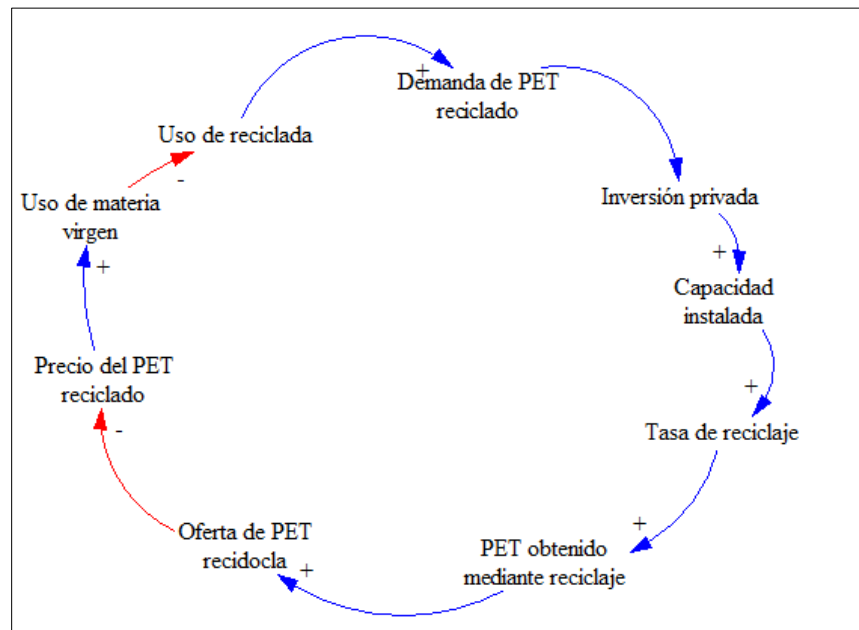
2.2.2 ESTABLECIMIENTO DE RELACIONES (DIAGRAMA CUASAL)

Identificadas las variables de salida del modelo se construye el diagrama causal (ver figura 4) que explica el comportamiento del sistema, en él se incluyen las variables que influyen en toda la actividad de reciclaje y que intervienen directamente en las variables a estudiar.

En la construcción del sistema se identificaron tres bucles. En el bucle 1 se representa el comportamiento de la industria de reciclables en la cual los entes privados reaccionan ante un incremento de la demanda del PET reciclado invirtiendo recursos para incrementar la capacidad instalada, logrando así aumentar la tasa de reciclaje del departamento, ofertando al mercado una mayor cantidad de PET obtenido mediante reciclaje, el cual reacciona ante la sobreoferta disminuyendo el precio de PET reciclado, lo cual disminuye progresivamente el uso de materia prima virgen, ya que los demandantes de resina PET encontrarán más atractivo, usar PET reciclado que PET virgen. Este efecto es retroalimentado y hace crecer la demanda de PET reciclado.

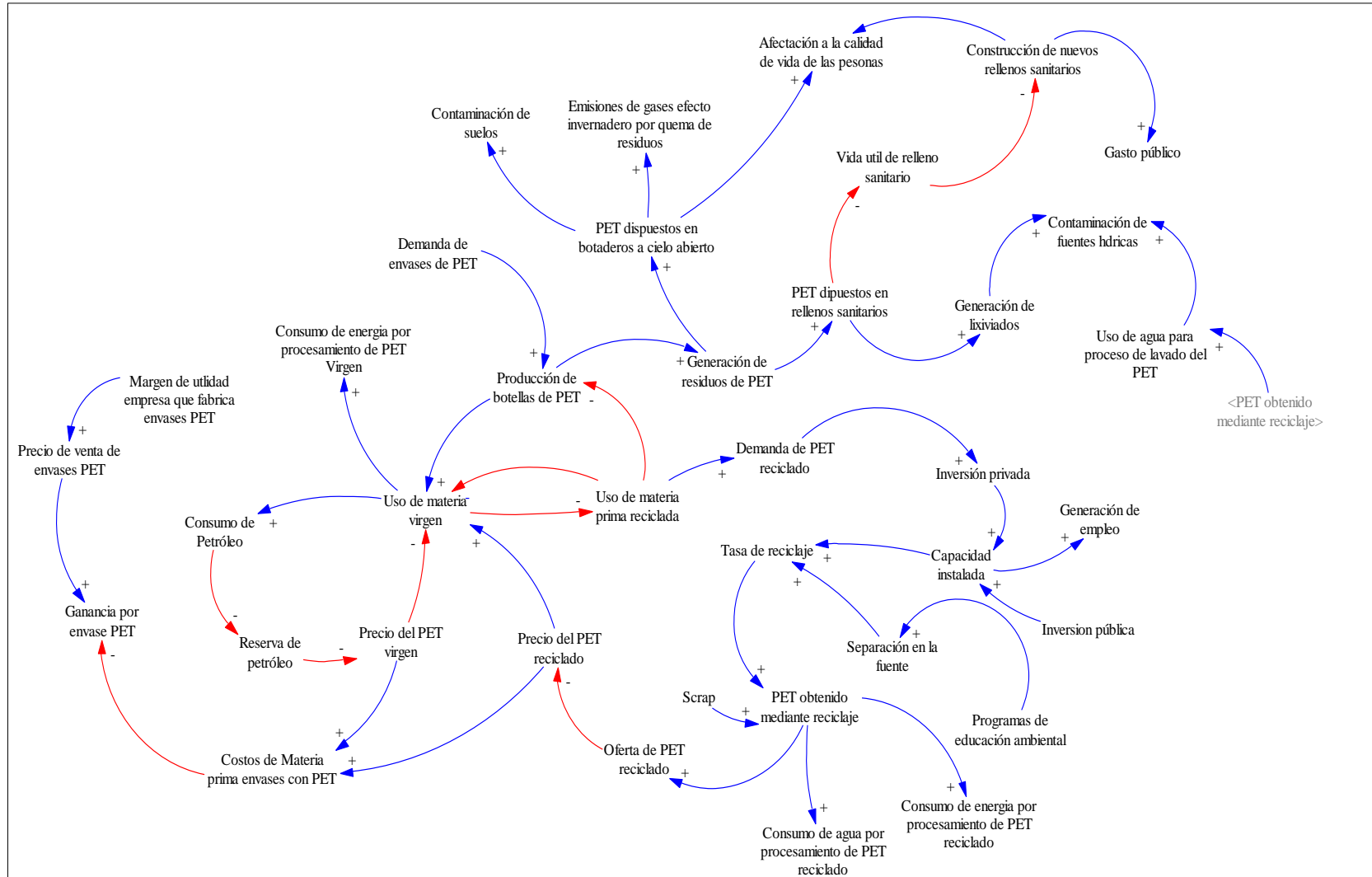
Sin embargo, hay que tener en cuenta que la disminución exagerada en el precio de PET reciclado, tiene un impacto en la tasa de reciclaje pues los recolectores de este material encontrarán poco atractivo reciclarlo ya que no les representaría utilidades.

Figura 3. Bucle 1.



Fuente: Los autores

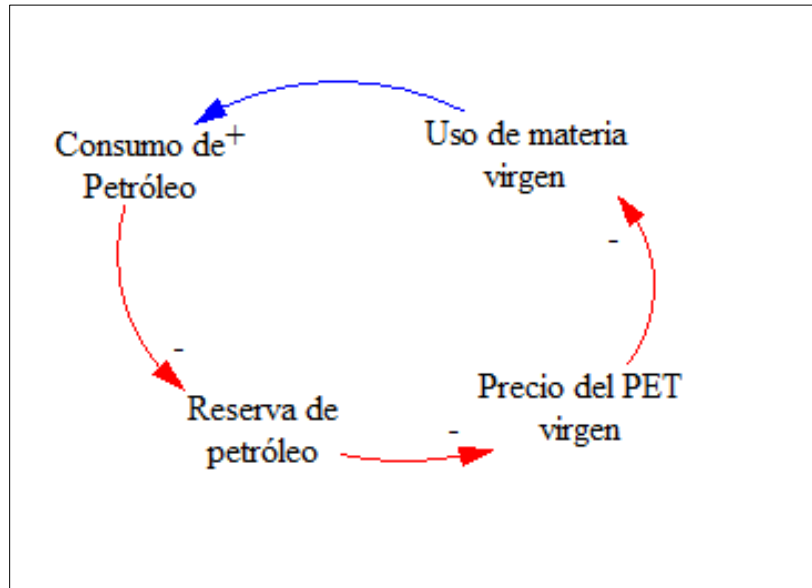
Figura 4. Diagrama Causal



Fuente: Los autores.

En el bucle 2 se observa como el precio de la resina virgen se ve afectado por las reservas de petróleo, las cuales se ven afectadas por el consumo de petróleo asociada al uso de materia PET virgen.

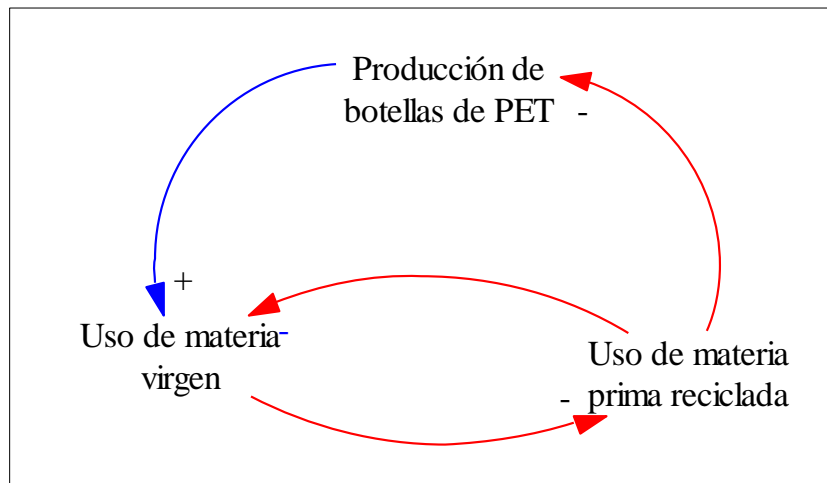
Figura 5. Bucle 2.



Fuente: Los autores

En el bucle 3 se observa como el uso de material reciclado se ve influenciado por los incrementos en la producción de botellas PET y la utilización de material reciclado. Como se puede observar entre mayor fabricación de botellas PET y menor sea el consumo de materiales reciclados mayor será el uso de PET virgen.

Figura 6. Bucle 3.



Fuente: Los autores

2.3 DIAGRAMA DE FORRESTER

Con base en el diagrama causal presentado anteriormente se diseñó el diagrama de Forrester, para realizar la simulación del sistema planteado, teniendo en cuenta la interacción existente entre cada una de las variables y su tipología. El diagrama se muestra en la figura 7.

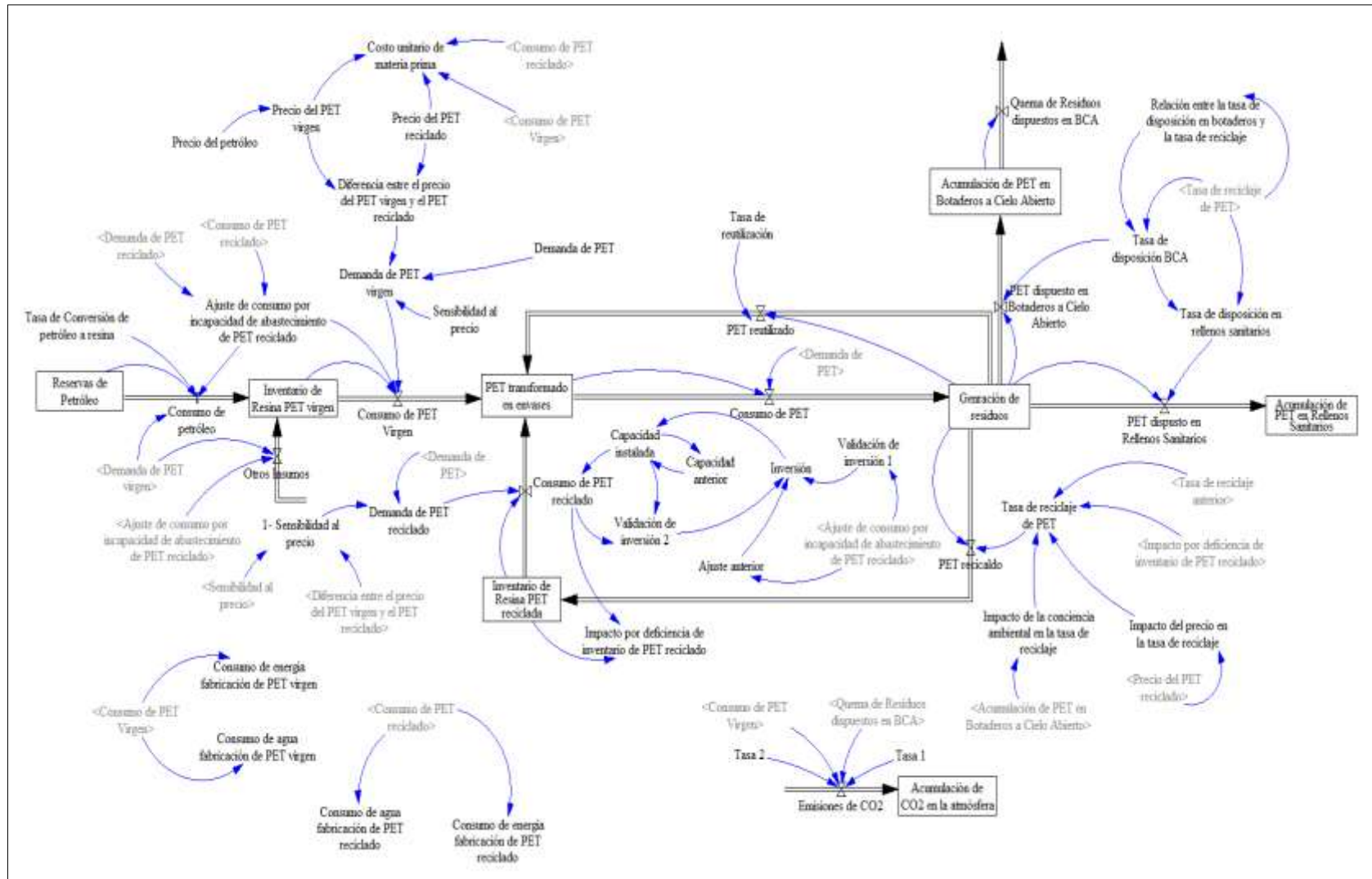
2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DEL DIAGRAMA

En esta sección se clasifican y describen cada una de las variables representadas en el diagrama de Forrester con sus respectivos parámetros utilizados:

VARIABLES DE NIVEL: Son aquellas que se quiere, cambien a través del tiempo en función de las variables de flujo, las cuales se describirán a continuación:

- **Reserva de Petróleo:** Representa la cantidad de petróleo disponible a nivel mundial. El valor inicial de Revista Ambientum 2012.
- **Inventario de Resina PET Virgen:** Se refiere a la cantidad de resina PET virgen que se produce. Se asume un inventario inicial de 4.500 toneladas según información suministrado por José Luis Abril gerente de PETRECOL [43].
- **PET transformados en artículos:** Es la cantidad en kilogramos de productos hechos con PET.
- **Generación de Residuos PET:** Representa la cantidad de residuos PET generados en el Valle del Cauca, su valor inicial se obtuvo a partir del “Informe sobre generación de residuos sólidos en el departamento del Valle del Cauca” [8]
- **Acumulación de PET en Botaderos a Cielo Abierto:** Expresa la cantidad de PET que es dispuesta en botaderos a cielo abierto.
- **Acumulación de PET en Rellenos Sanitarios:** Expresa la cantidad de PET que se espera sea almacenada en el relleno sanitario (RS) y se define como la cantidad de PET dispuesto en el relleno sanitario por la tasa de disposición en RS a lo largo del tiempo.
- **Inventario de Resina PET Reciclada:** Se refiere a la cantidad de resina PET reciclada que se produce. Su valor se obtiene de la resta entre lo consumido y las cantidades que se reciclan con un valor inicial de 1.320 toneladas/año según información suministrado por José Luis Abril gerente de PETRECOL [43].

Figura 7. Diagrama Forrester



Fuente: Los autores

- **Acumulación de CO₂ en la atmósfera:** Es la cantidad de CO₂ que se genera en el ambiente por quema de residuos, consumo de PET virgen y depósito de residuos sólidos en rellenos sanitarios

VARIABLES DE FLUJO: Son aquellas que determinarán las decisiones que tomará el modelo, siendo consecuentes con el entorno y buscando la aproximación de este a la realidad en el transcurso del tiempo.

- **Otros Insumos:** Hace referencia a otros componentes de la resina PET virgen como derivados líquidos de gas natural y aire.
- **Consumo de petróleo:** Es la cantidad de petróleo que se utiliza para la producción de PET.
- **Consumo de PET virgen:** Es la cantidad en Toneladas que se consume de PET virgen de acuerdo con su demanda. Si la demanda de PET reciclado no puede ser suplida este consumo deberá reaccionar y ofrecer lo que demande el mercado.
- **Consumo de PET:** Es el consumo de productos de PET sin distinguir su materia prima. Este consumo crece a razón del 23% al año. [44]
- **PET dispuestos en Botadero a Cielo Abierto:** Cantidad de los residuos PET generados que tienen como disposición final los botaderos a cielo abierto. Es la tasa a la cual se dispone PET en botaderos a cielo abierto. Se define como el residuo entre la tasa de disposición en rellenos sanitarios y la tasa de disposición en botaderos a cielo abierto.
- **Quema de Residuos:** Esta variable permite reducir la cantidad de residuos PET dispuestos en botaderos a cielo abierto (BCA), teniendo en cuenta que la quema es la forma como los habitantes de zonas aledañas a los BCA los tratan.
- **PET Dispuesto en Relleno Sanitario:** Equivale a la cantidad de residuos PET generados que tiene como disposición final el relleno sanitario.
- **PET Reciclado:** Cantidad de residuos de PET generados que son reprocesados y utilizados como materia prima para la fabricación de otros productos.
- **Consumo de PET Reciclado:** Es el PET efectivamente consumido teniendo en cuenta las restricciones de capacidad instalada y el inventario de materia prima para procesar según la demanda.

- **Emisiones de CO₂:** Cantidad de CO₂ enviado a la atmósfera por producción de PET virgen y por la quema de residuos.
- **PET reutilizado:** Cantidad de scrap⁵ generado en la industria que es reutilizado en para la producción de envases.

VARIABLES AUXILIARES: Las variables auxiliares representan los cálculos y los parámetros que se necesitan dentro del modelo para facilitar su claridad y acercarlo a la estructura general del sistema que se ha querido representar.

- **Relación entre tasa de disposición en rellenos sanitarios y tasa de reciclaje:** Esta relación se obtiene con base en datos históricos desde el año 2006 hasta el 2011, y está condicionada por la cantidad de PET que se recicla. [43]
- **Tasa 1:** Es la cantidad de Kg de CO₂ producidos por tonelada de PET que se queman.
- **Tasa 2:** Es la cantidad de Kg de CO₂ producidos por tonelada producida de PET virgen.
- **Tasa de reciclaje inicial:** Es el valor actual de la tasa de reciclaje de PET en el Valle del Cauca, de acuerdo con información suministrada por José Luis Abril gerente de PETRECOL [43].
- **Tasa de reciclaje de PET:** Es la tasa a la cual se recicla el PET. Esta depende de variables exógenas.
- **Tasa de disposición en rellenos sanitarios:** Es la tasa a la cual se dispone PET en rellenos sanitarios. Expresa la proporción porcentual de los residuos generados de PET que son dispuestos en rellenos sanitarios y está condicionada al comportamiento de la tasa de reciclaje.
- **Tasa de disposición en Botaderos a Cielo Abierto:** Expresa la proporción porcentual de los residuos generados de PET que son dispuestos en BCA y está condicionada al comportamiento de la tasa de disposición en relleno sanitario y la tasa de reciclaje.
- **Tasa de reutilización:** Es la tasa a la cual se reutiliza el PET (scrap) generado en la industria. Debido a que dentro de la investigación realizada

⁵ Scrap se denomina a las preformas o botellas terminadas que dentro del proceso de soplado del envase resultan defectuosas.

no se encontraron evidencias de se realice este tipo de disposición en el Valle del Cauca se asume como cero.

- **Ajuste de consumo por incapacidad de abastecimiento de PET reciclado:** Es el ajuste que realiza el modelo cuando la oferta de PET reciclado no es capaz de suplir su demanda, aumentando la cantidad de PET virgen que se utiliza.
- **Capacidad instalada:** Es la capacidad instalada inicialmente en el Valle del Cauca, más las inversiones que se hagan a lo largo del tiempo.
- **Sensibilidad al precio:** Es una tabla que muestra la reacción al precio que tienen los productores frente a variaciones entre el costo del material virgen y reciclado.
- **1-Sensibilidad al precio:** Es el inverso de sensibilidad al precio e indica el porcentaje del consumo de PET que debe ser satisfecho por PET reciclado dado el atractivo que representa para los productores.
- **Demanda de PET:** Pronóstico de la cantidad de PET que será requerida por la industria para la fabricación de artículos.
- **Demanda de PET reciclado:** Cantidad de PET reciclado requerido por la industria. Depende de lo atractivo que encuentren los productores fabricar con resina reciclada y es afectada por la sensibilidad al precio.
- **Demanda de PET virgen:** Cantidad de PET virgen requerido por la industria. Depende de lo atractivo que encuentren los productores fabricar con resina reciclada según el precio.
- **Diferencia entre el precio del PET virgen y el PET reciclado:** Se utiliza como base para la estimación de la demanda de PET reciclado, a partir de la divergencia entre el precio del PET virgen y el reciclado.
- **Precio del petróleo:** Esta variable importa desde Excel los precios estimados del petróleo calculados a partir de los datos de los últimos 17 años.⁶
- **Precio del PET virgen:** Es el precio del material virgen, obtenido a partir de su relación con el precio del petróleo.

⁶ Fuente: US Energy Information Administration

- **Precio del PET reciclado:** Esta variable importa desde Excel los precios del material reciclado obtenido a partir de información secundaria. [29]
- **Capacidad anterior:** Esta variable equivale al valor de la capacidad instalada con un retraso de un período de tiempo y tiene un valor inicial de 4000 Ton/ Año, valor obtenido de la Revista plásticos en Colombia (2011).
- **Consumo anterior:** Equivale al ajuste por incapacidad de abastecimiento de PET reciclado en el periodo anterior.
- **Impacto en la tasa de reciclaje por precio de PET reciclado:** Variable binaria que toma un valor de 1 cuando en el período anterior el precio de PET reciclado es inferior a un valor estimado de \$1500 / Kg.
- **Impacto de la conciencia ambiental en la tasa de reciclaje:** Variable binaria que toma el valor de 1 cuando la acumulación de residuos en BCA alcanza un valor determinado, ya que este es el punto donde se espera que la comunidad reaccione y tome medidas para mejorar las actuales formas de disposición.
- **Impacto por deficiencia de inventario de PET reciclado:** Es una variable binaria que toma el valor de 1 siempre y cuando el inventario de PET reciclado sea igual al consumo de PET reciclado y esto se deba a la falta de capacidad instalada.
- **Consumo de energía producción de PET reciclado:** Esta variable expresa la cantidad de energía que utiliza para la producción de PET reciclado.
- **Consumo de energía producción de PET virgen:** Esta variable expresa la cantidad de energía que utiliza para la producción de PET virgen.
- **Consumo de agua producción de PET virgen:** Expresa la cantidad de agua requerida para procesar el PET virgen.
- **Consumo de agua producción de PET reciclado:** Expresa la cantidad de agua requerida para procesar el PET reciclado.
- **Tasa de conversión de petróleo a resina:** Es la cantidad de petróleo requerida para la producción de 1 tonelada de PET virgen.
- **Validación de inversión 1:** Variable binaria donde 1 significa necesidad de inversión y 0, que no es necesario invertir, dependiendo de la demanda insatisfecha de PET reciclado.

- **Validación de inversión 2:** Variable binaria con la que se valida que el abastecimiento sea por falta de capacidad.
- **Inversión:** Esta variable aumenta la capacidad instalada para la producción de PET reciclado en un 50% cuando se dan desabastecimiento del material reciclado debido a faltas de capacidad instalada.
- **Tiempo Final:** 2037
- **Tiempo inicial:** 2012
- **Paso del Tiempo:** 1

2.3.2 SUPUESTO:

Para la simulación de la situación problema planteado se tiene los siguientes supuestos:

- El aumento de la demanda de productos hechos a base del PET se mantiene constante, no se consideran sustitutos para este producto.
- Existe incertidumbre sobre si los aumentos de la demanda de PET reciclado se mantengan constantes y continúen con la tendencia al aumento, por tanto la decisión de invertir por parte de los empresarios para aumentar capacidad, de llegarse a comprobar que la no satisfacción de demanda se deba a una falta de capacidad instalada, solamente aumentará un 50% del desabastecimiento.
- La decisión de proporción entre materia prima virgen y reciclada depende solamente del precio de éste, con un límite de mezcla de 20% virgen y 80% reciclado.
- Si el mercado demanda más producto reciclado del que se puede ofrecer, este desabastecimiento será suplido con materia prima virgen, pero la demanda de PET siempre será satisfecha.

3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo aborda la cuarta etapa contemplada por Aracil y Gordillo para la realización de un estudio dinámico, y es la interpretación de resultados, por medio de la reproducción del comportamiento previsto, un análisis de los diferentes escenarios que pudiesen suceder y un análisis de sensibilidad.

3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO

Dentro del proceso de construcción del modelo un paso vital es la validación en la cual se realiza un contraste entre los datos reales y los obtenidos por la simulación, con el fin de verificar que el modelo siga un comportamiento, patrón o tendencia ajustado a la realidad o que por el contrario discrepe totalmente. El grado de similitud que exista entre los datos reales y los que arroja el modelo, permite apreciar que tan acertada ha sido la modelación del sistema evaluado.

La tabla 4 muestra el consumo de PET virgen y reciclado entre los años 2005 y 2010, para efectos de la investigación se realizó la simulación para 25 periodos de tiempo con la tasa aproximada de 2005 (10%).

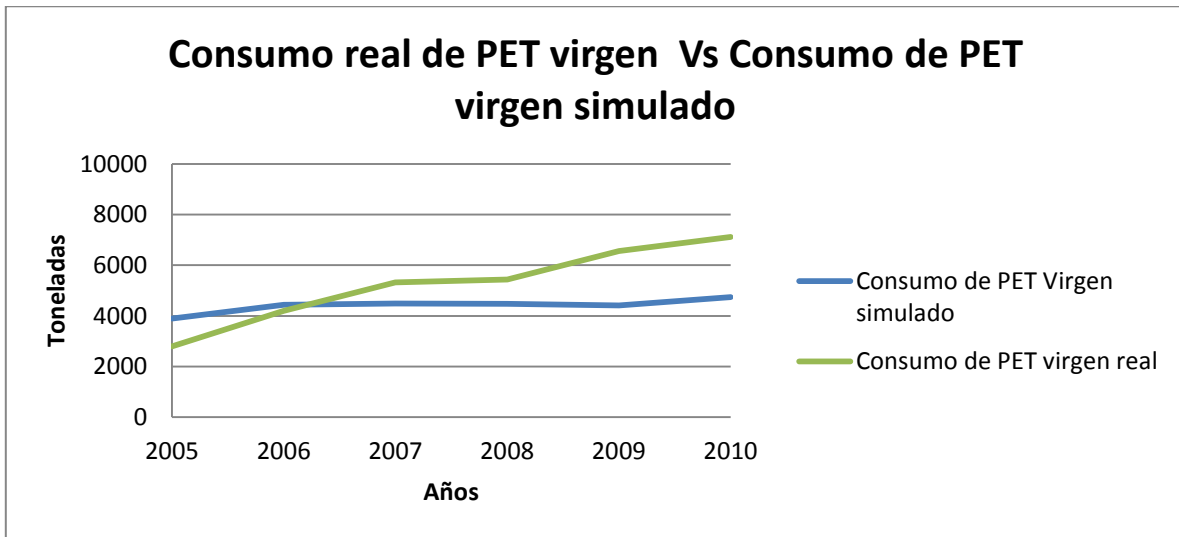
Tabla 4. Demanda de PET reciclado y PET virgen en el Valle del Cauca entre 2005 y 2010

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Consumo de PET virgen Real	2800	4200	5320	5440	6560	7120
Consumo de PET reciclado Real	532	640	756	1200	1420	1715

Fuente: Los autores

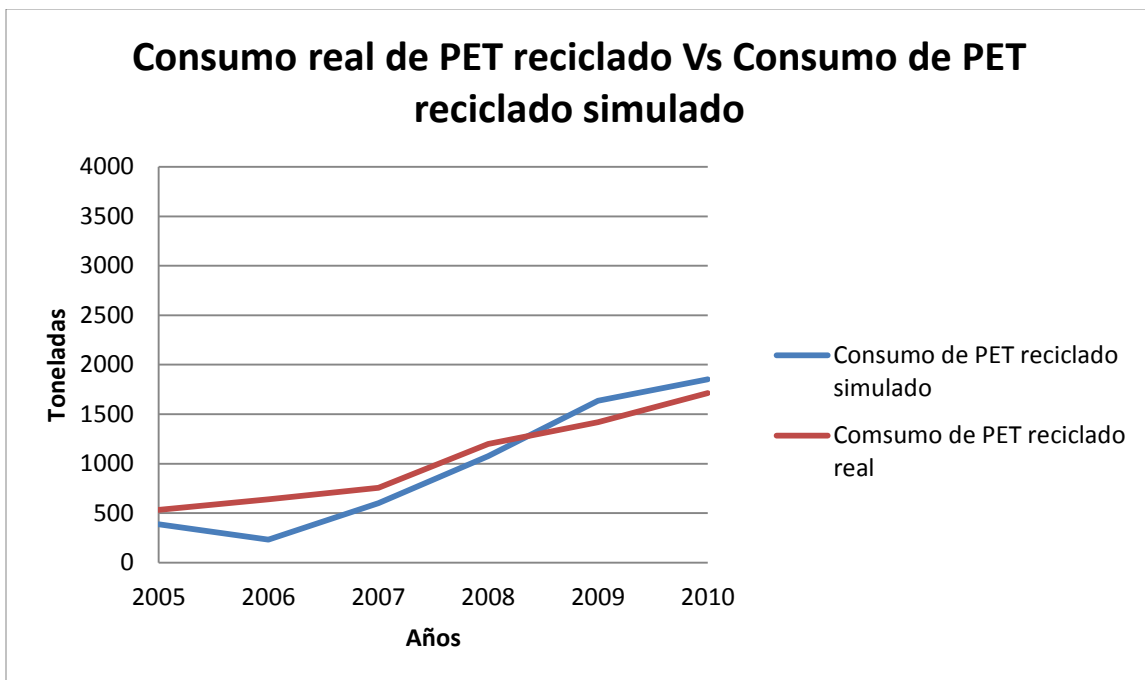
Como se puede observar en las gráficas 1, 2 y 3 los consumos reales de materia prima PET virgen y reciclada reales en comparación con los resultados obtenidos en la simulación reflejan un comportamiento similar en cuanto a la tendencia de los resultados, por lo tanto se puede asumir que las conclusiones a las que se llegue con los resultados de la simulación referentes al impacto ambiental del reciclaje y reutilización de PET en el Valle del Cauca serán replicables al comportamiento real del sistema.

Gráfica 1. Consumo real de PET virgen Vs Consumo de PET virgen simulado



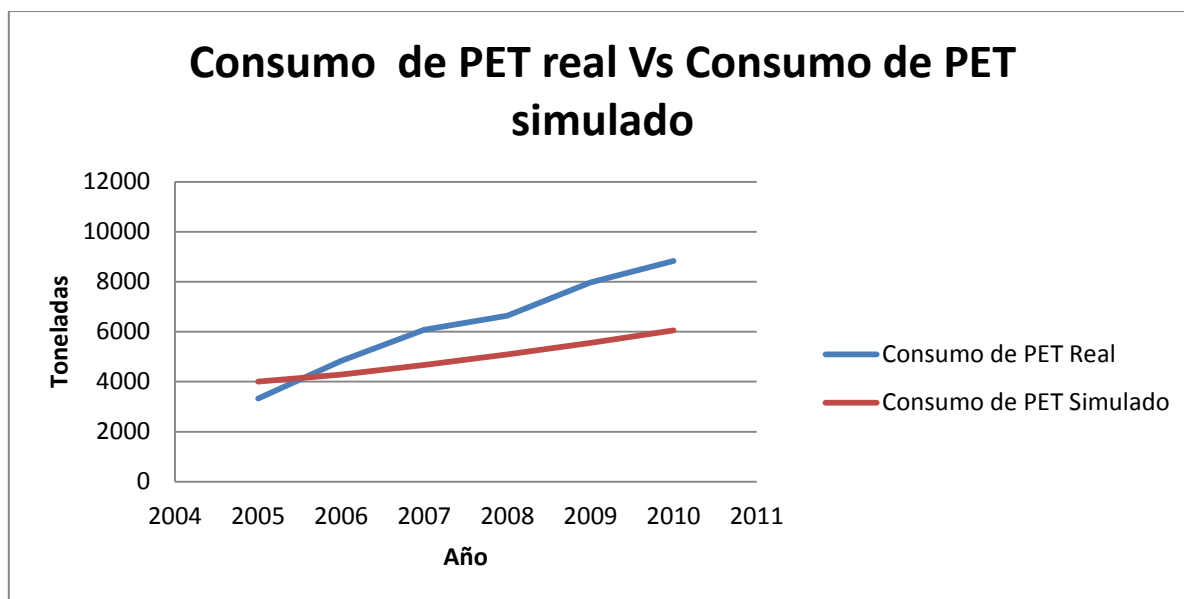
Fuente: Los autores

Gráfica 2. Consumo real de PET reciclado Vs Consumo de PET reciclado simulado



Fuente: Los autores

Gráfica 3. Consumo de PET real Vs Consumo de PET simulado.



Fuente: Los autores

3.2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Para determinar el impacto que tiene la tasa de reciclaje en el factor social, ambiental y económico se realizan una variación de esta en tres escenarios distintos, seleccionados teniendo en cuenta la tasa de reciclaje de 2005 (24%) la tasa aproximada de 2012 (30%) y una tasa futura de (40%) seleccionada de acuerdo al criterio de los expertos, en la tabla 5 se definen los escenarios definidos para la tasa de reciclaje.

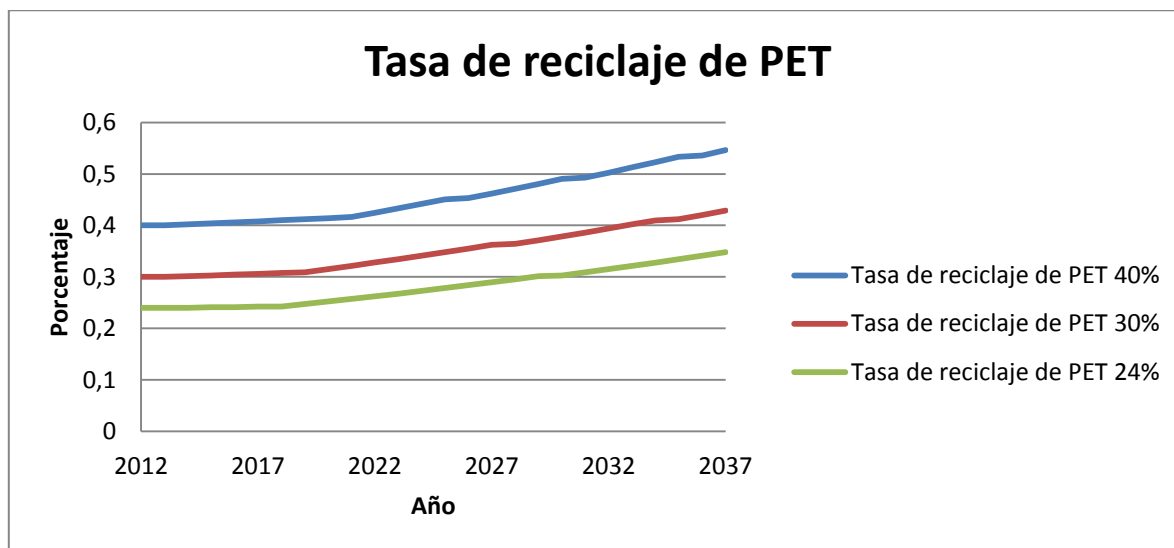
Tabla 5. Escenarios de variación de la tasa de reciclaje

Escenarios	1	2	3
Tasa de reciclaje inicial	24%	30%	40%

Fuente: Los autores

En la gráfica 4 se puede observar el comportamiento de la tasa de reciclaje de PET en los diferentes escenarios, como se puede apreciar para las tres situaciones planteadas se generan incrementos en la tasa de reciclaje debidas principalmente a la incapacidad del inventario de PET reciclado por suplir la demanda.

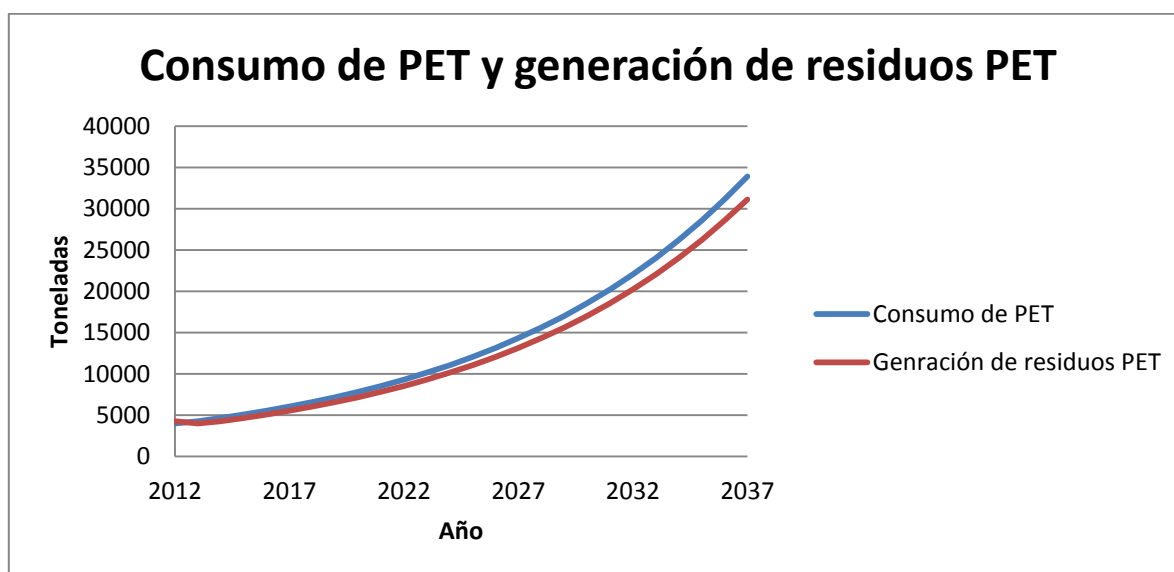
Gráfica 4. Tasa de reciclaje de PET



Fuente: Los autores

Como se puede observar en la gráfica 5 el consumo de envases PET tiene un crecimiento del 9% anual, lo cual se ve reflejado en un aumento en la misma proporción de residuos generados de este material. Cabe mencionar que independientemente de la tasa de reciclaje que se utilice, la generación de residuos mantendrá su crecimiento pues no depende directamente de éste si no de las prácticas de consumo de la población.

Gráfica 5. Consumo de PET y generación de residuos PET



Fuente: Los autores

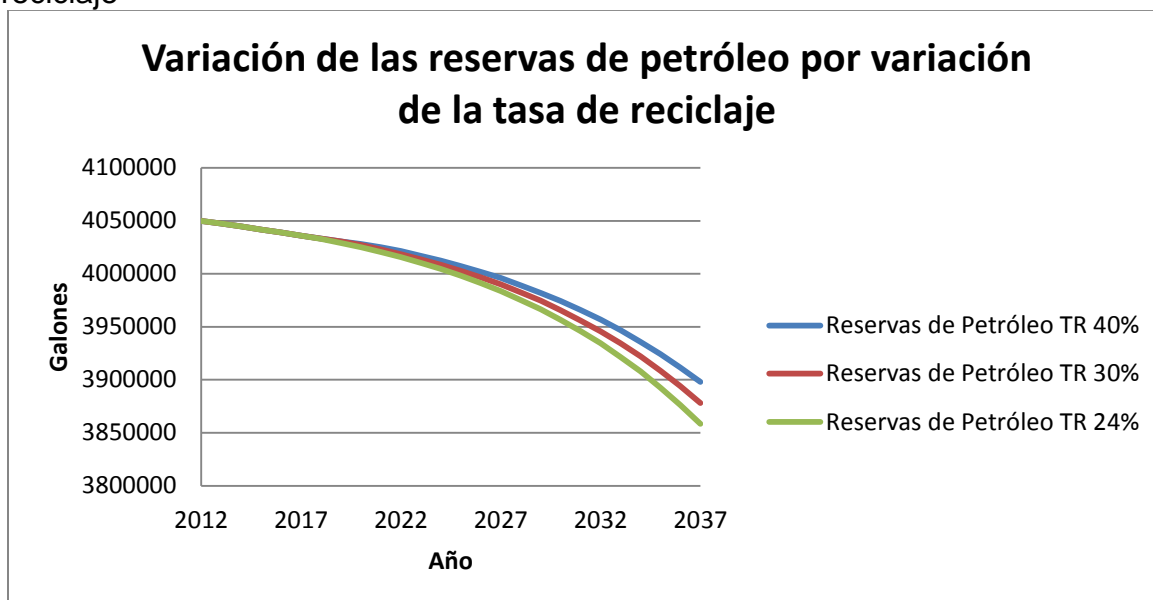
Los impactos que estos residuos generan al medio ambiente depende de la forma como son tratados pos-consumo, reciclados, dispuestos en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto y es de estas formas de disposición de donde se derivan los efectos ambientales que son de interés para este trabajo de investigación.

3.2.1 IMPACTOS AMBIENTALES

Respecto a este punto es importante considerar que tanto en la producción de PET virgen como en la de reciclado, se hace uso de recursos naturales y energéticos, además se genera contaminación atmosférica debido a emisiones de CO₂.

Uno de los aspectos ambientales asociados a la producción de PET virgen, es la dependencia de materia prima proveniente del petróleo. En la gráfica 6 se indica el comportamiento de las reservas de petróleo ante variaciones de la tasa de reciclaje (TR), como era de esperarse para la TR del 24% las reservas de petróleo presenta una disminución más acelerada debido al mayor consumo de materiales vírgenes para satisfacer la demanda. También debe tenerse en cuenta que de todo el petróleo producido el 4% es destinado para a la industria petroquímica y que el 64% de una tonelada de PET es petróleo [45] por lo tanto de continuarse con el consumo actual se llegará a un punto en que no se contará con reservas suficientes para elaboración de materiales plásticos vírgenes en la industria.

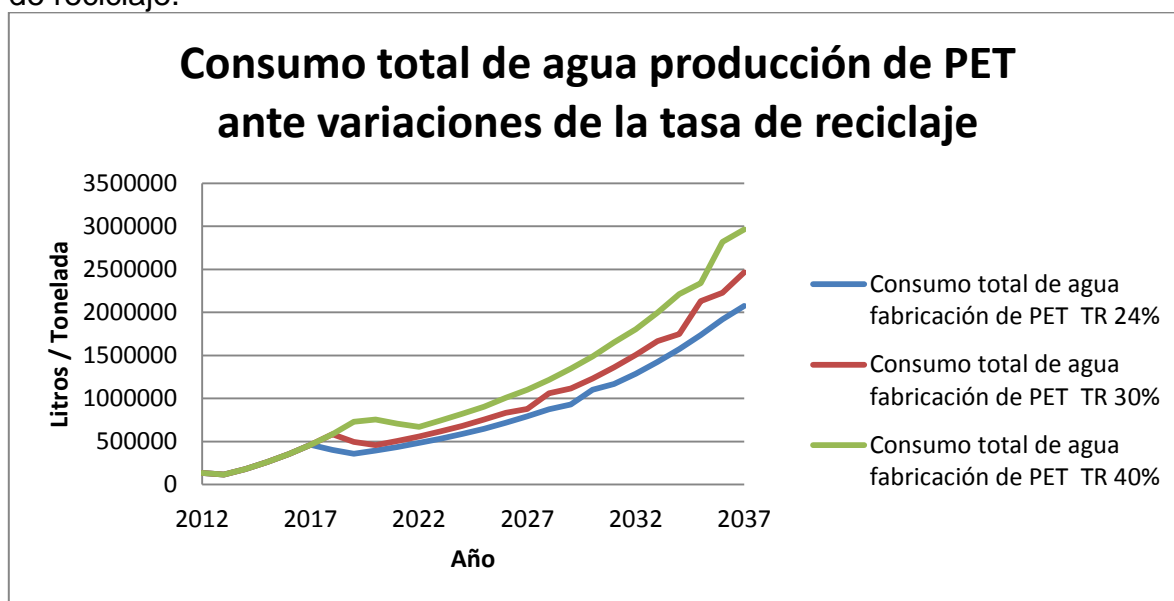
Gráfica 6. Variación de las reservas de petróleo por variación de la tasa de reciclaje



Fuente: Los autores

Otro punto importante a considerar es el consumo de agua asociado tanto a la producción de material virgen como reciclado, como se puede observar en la gráfica 7 a medida que se presentan incrementos en la tasa de reciclaje, la cantidad de agua utilizada para la producción de PET incrementa, lo que concuerda con el estudio realizado por el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS) [33], en el cual se demostró que la producción de PET reciclado requiere cantidades de agua mayores a las del PET virgen debido a la necesidad de lavado del material, por lo que se asevera que los resultados arrojados por la simulación son consecuentes con la realidad.

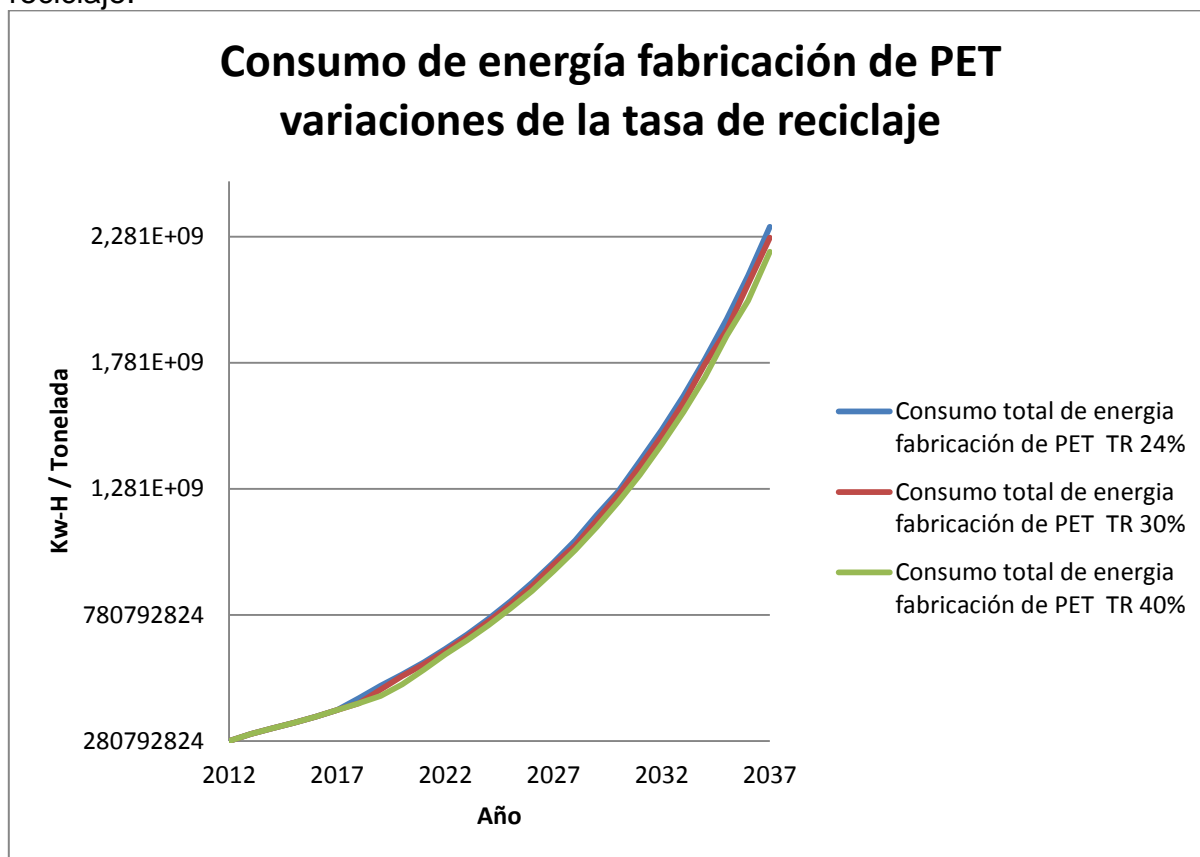
Gráfica 7. Consumo total de agua producción de PET ante variaciones de la tasa de reciclaje.



Fuente: Los autores

Dentro de la simulación realizada también se consideraron los efectos debido al consumo de energía. Como se puede observar en la gráfica 8, los Kilovatios hora utilizados para la producción de material virgen en las diferentes tasas de reciclaje evaluadas, superan los utilizados para la obtención del PET reciclado, estos resultados son similares a los datos que deben presentarse en la realidad de acuerdo con la Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector plásticos [46], el artículo *An introduction to plastic recycling* [36] y *Recycling of PET* [47], pues de acuerdo con estos la producción de PET reciclado requiere entre un 45% y 60 % menos energía que la fabricación de materiales vírgenes debido principalmente a la cantidad de calor necesaria para transformar el material en productos terminados.

Gráfica 8. Consumo de energía fabricación de PET variaciones de la tasa de reciclaje.



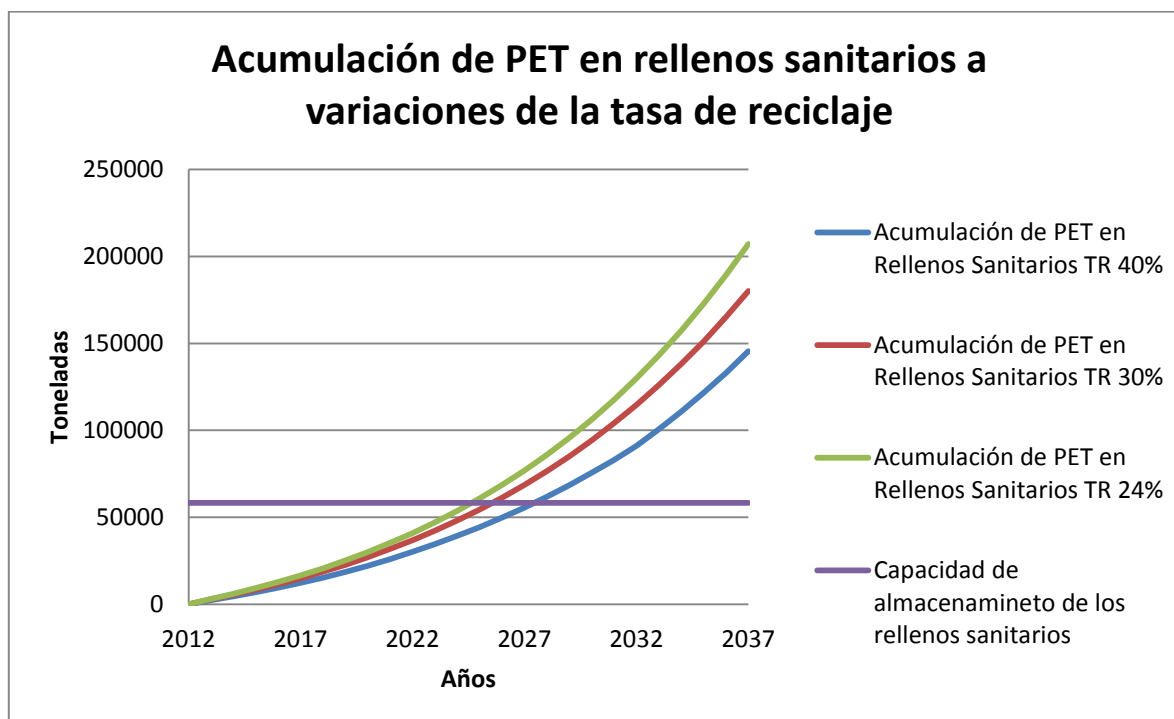
Fuente: Los autores

En lo referente a la disposición final, los impactos ambientales son acumulativos y de largo plazo, teniendo en cuenta que el PET tiene un tiempo de degradación de entre 100 y 500 años, lo que genera que no se reincorporen fácilmente a los ciclos naturales, permaneciendo por largos periodos en el ambiente y afectando de diferentes maneras los lugares donde quedan dispuestos. Por ejemplo, de acuerdo con la investigación realizada, los rellenos sanitarios construidos en el Valle del Cauca tienen una capacidad de almacenamiento de 58400 [48] toneladas de residuos en promedio⁷ durante su vida útil; como se puede observar en la gráfica 9 al incrementar la tasas de reciclaje se logra prolongar la vida útil de los rellenos sanitarios y además reducir la generación de lixiviados y contaminantes para las aguas subterráneas debido a la sudoración de los envases y la acumulación de aguas lluvias. Sin embargo, no es suficiente reciclar los residuos,

⁷ Es necesario considerar que éste es un valor estimado, teniendo en cuenta las cantidades de residuos generados en el Valle del Cauca, la cantidad de municipios que supe cada relleno existente en la región y los sistemas de recolección con que cuenta cada municipalidad.

se hace necesario cambiar las tendencias de consumo de la población de forma que se pueda reducir las cantidades de residuos que se disponen en estos sitios.

Gráfica 9. Acumulación de PET en rellenos sanitarios a variaciones de la tasa de reciclaje

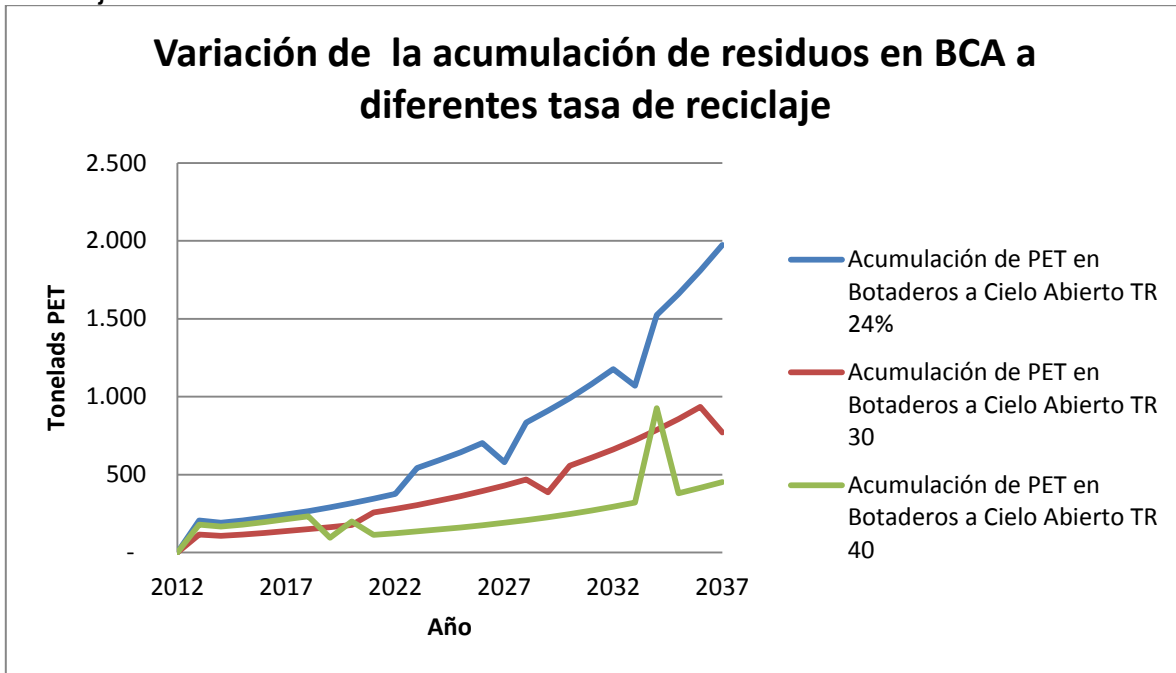


Fuente: Los autores

Por otro lado se tiene la disposición de residuos BCA, una de las prácticas más comunes en las zonas rurales y aledañas a las ciudades en el Valle del Cauca donde los sistemas de recolección de residuos tienen poco o ningún acceso, por otro lado este tipo de manejo de residuos trae consigo problemas ambientales más graves como la generación de CO_2 y otros gases de efecto invernadero debido a la quema de residuos, pérdida de nutrientes y calidad del suelo, inundaciones y deslizamientos debidas al arrastre de residuos en temporadas de lluvia, disminución de la percepción paisajística del entorno [6].

Como se muestra en la gráfica 10 ante tasas de reciclaje bajas, la cantidad de residuos depositados en BCA aumenta, si se aplicaran políticas públicas y/o privadas para la gestión de residuos y se aumentaran la toma de consciencia de las personas y el reciclaje, se lograría una disminución considerable de los residuos en BCA y se reducirían las emisiones de CO_2 , al reducir la quema de residuos.

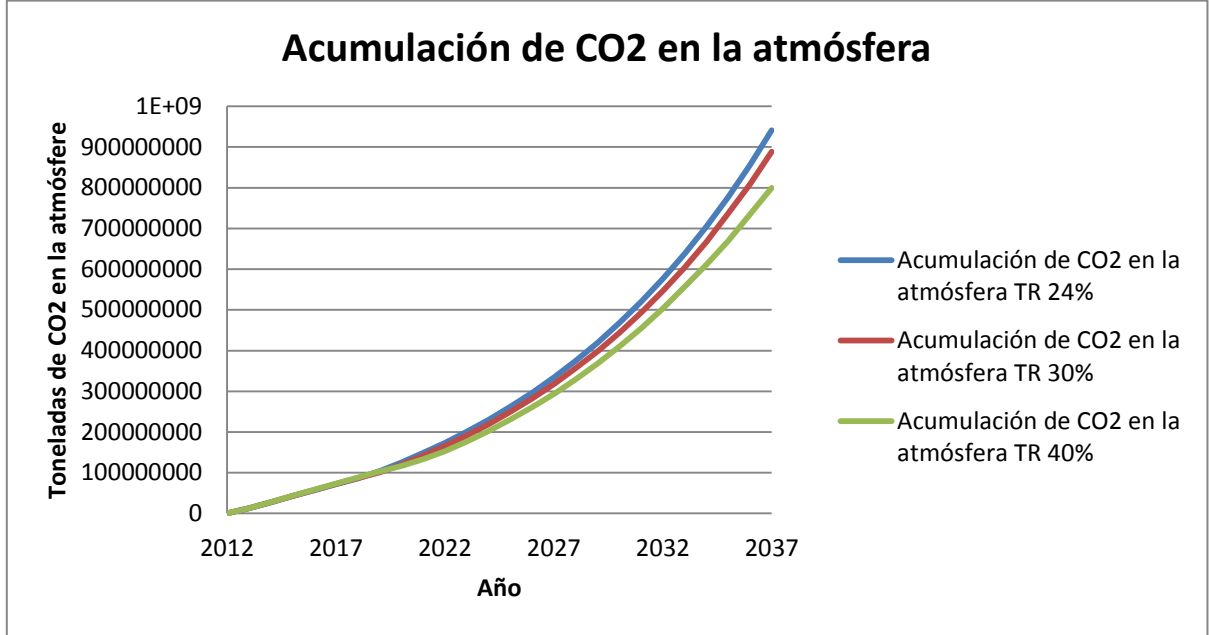
Gráfica 10. Variación de la acumulación de residuos en BCA a diferentes tasa de reciclaje



Fuente: Los autores

Por último la Acumulación de CO₂ en la atmosfera la cual es producto de la producción de PET virgen, reciclado, la quema de residuos y la disposición en rellenos. En la gráfica 11 se puede ver como el implementar mecanismos para el reciclaje de residuos puede disminuir la cantidad de emisiones de CO₂ en el entorno y teniendo en cuenta la problemática actual asociada al calentamiento global y el cambio climático el crecimiento casi exponencial del CO₂ en la atmosfera producto de la fabricación y disposición de residuos hace considerar la importancia de mejorar las actuales prácticas de consumo de las personas ya que esta es la única manera que existe para disminuir esta generación pues se atacarían las dos fuentes principales, la producción de PET virgen (impulsada por la demanda de material plástico) y la disposición y tratamiento de los residuos PET pos consumo.

Gráfica 11. Acumulación de CO2 en la atmósfera

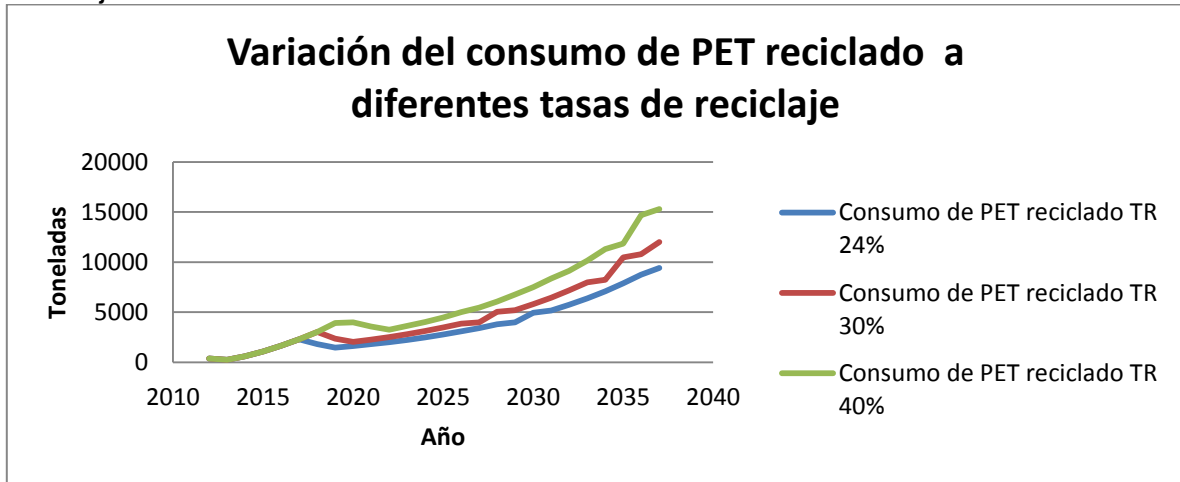


Fuente: Los autores

3.2.2 IMPACTO ECONÓMICO

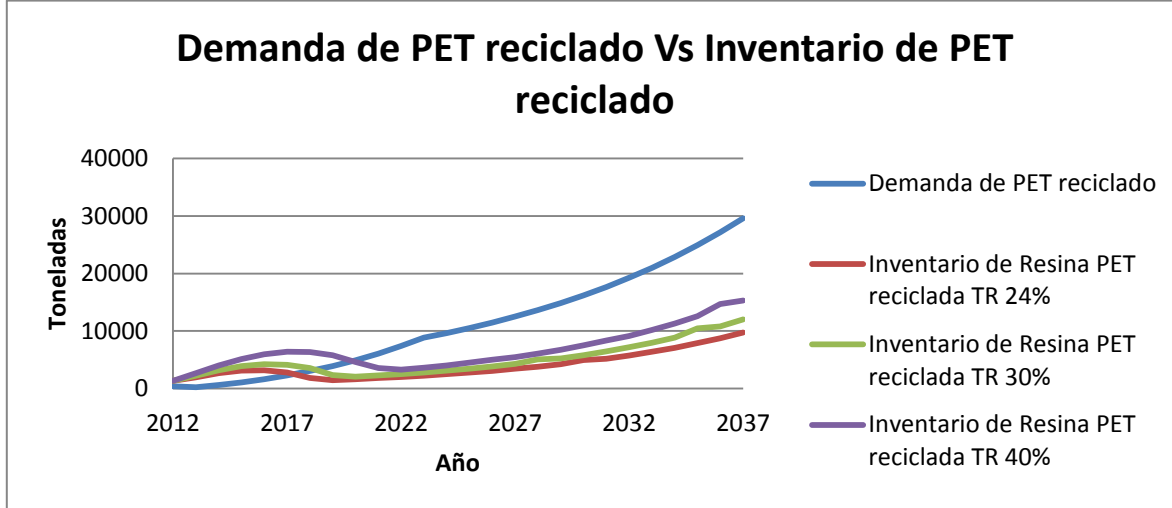
Como se muestra en la gráfica 12 y de acuerdo con la simulación realizada al incrementar el material reciclado disponible, las empresas optan por adquirir mayores cantidades de materia prima reciclada, sin embargo el inventario de materia reciclado disponible en el mercado se queda corto ante los incrementos significativos de la demanda (gráfica 13).

Gráfica 12. Variación del consumo de PET reciclado a diferentes tasas de reciclaje.



Fuente: Los autores

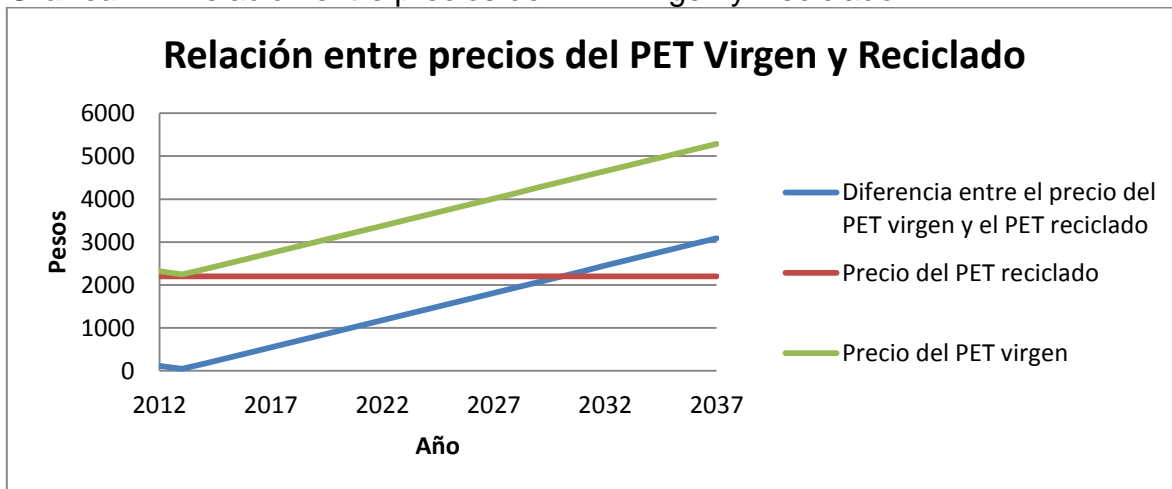
Gráfica 13. Demanda de PET reciclado Vs Inventario de PET reciclado



Fuente: Los autores

Para el impacto económico también se evaluó el efecto del costo de materias primas de los productores de artículos hechos a partir de PET, según se fabrique a partir de resina virgen o resina reciclada. En la simulación se tiene el precio de la resina reciclada como una variable constante, mientras que el precio de la resina virgen aumenta debido a la proyección de costos del petróleo, el cual influye directamente en el precio de este. De acuerdo con la gráfica 14 la diferencia del precio del PET reciclado y precio del PET virgen aumenta, en favor al PET reciclado lo cual incentiva a los productores a preferir esta como materia prima; sin embargo, como la producción de PET reciclado no es suficiente para satisfacer la demanda de PET se hace necesaria la adquisición de material virgen.

Gráfica 14. Relación entre precios del PET Virgen y Reciclado



Fuente: Los autores

3.2.3 IMPACTO SOCIAL:

Los efectos sociales para la situación problema planteada se encuentran definidos de forma implícita dentro del modelo; por ejemplo la acumulación de residuos en el relleno sanitario y botaderos a cielo abierto trae consigo afectaciones a la salud humana debido a la proliferación de vectores quienes encuentra en estos sitios las condiciones óptimas para proliferar, lo que puede causar enfermedades a las poblaciones aledañas ya que la mayoría de vectores son portadores de patógenos. Además, la generación de olores desagradables causantes de enfermedades respiratorias (especialmente en niños) en los habitantes de zonas aledañas a estos sitios de disposición y de acuerdo al estudio realizado por GESP⁸ la exposición a los agentes contaminantes provenientes de los depósitos de basura por dispersión aérea pueden ocasionar retardo en el crecimiento físico de los niños entre 0 y 3 años [49].

También debe tenerse en cuenta que los incrementos en la tasa de reciclaje y por ende, la disminución de las tasas en los otros mecanismos de disposición, están ligados al incremento de la conciencia ambiental por parte de los consumidores, alentada principalmente por el aumento en el consumo de materiales reciclados y la implementación de políticas para mejorar el manejo de residuos y disposición de residuos, generando un efecto positivo en el medio ambiente.

3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La finalidad de esta fase es examinar la consistencia del modelo ante cambios en los parámetros utilizados, analizar como el cambio de una variable incide en los resultados del modelo y detectar las variables para las cuales el modelo es más sensible y localizar las que tienen poca influencia su comportamiento.

Para este análisis se tuvo en cuenta el rango dentro del cual los parámetros fijos podían variar, según el grado de incertidumbre que estos tienen. En la tabla 6 definen los rangos de variación de la constante utilizada para el análisis, para el cual se utilizó la distribución normal con la cual se determina que los valores más cercanos a la media tengan mayor posibilidad de ocurrencia.

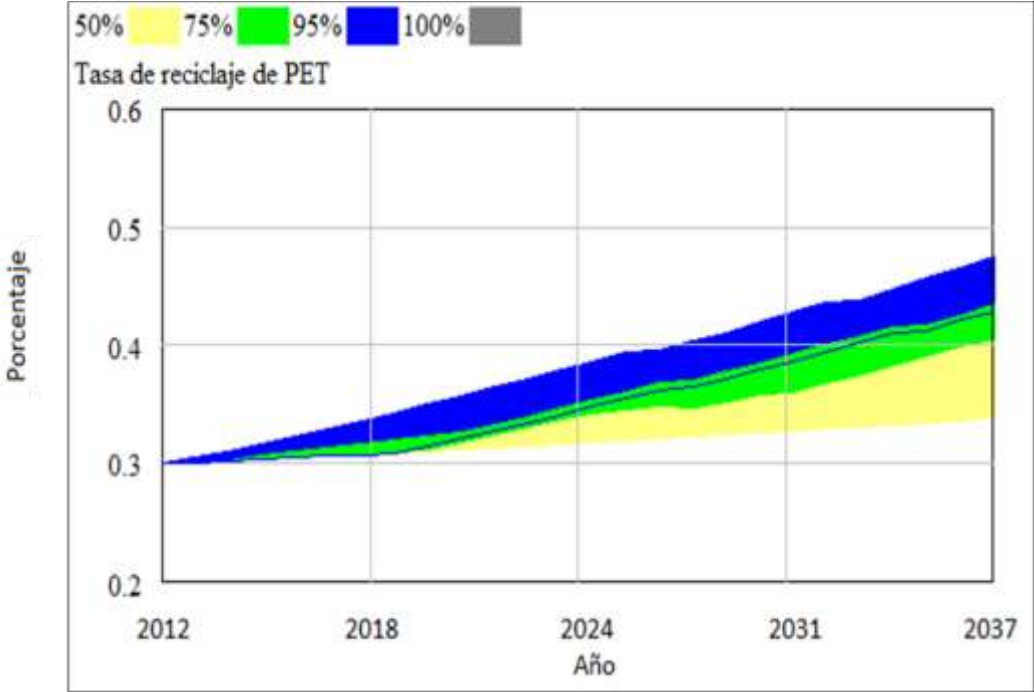
Tabla 6. Parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad:

Parámetro	Variación entre		Valor real	Unidad de medida.
	Valor mínimo	Valor máximo		
Precio del PET reciclado	1.200	6.000	2.200	\$/Kg
Tasa de reutilización	10	15	0	Porcentaje

⁸ Grupo de Epidemiología y salud pública

Teniendo en cuenta que el precio del PET reciclado puede oscilar entre \$1.200 y \$6.000 de acuerdo con el estudio nacional de reciclaje [29], se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el efecto de este en la tasa de reciclaje, como se puede observar en la gráfica 15, la tasa de reciclaje ante variaciones del precio del material reciclado, mantendrá su comportamiento creciente con una probabilidad del 95%.

Gráfica 15. Tendencia de la tasa de reciclaje de PET.

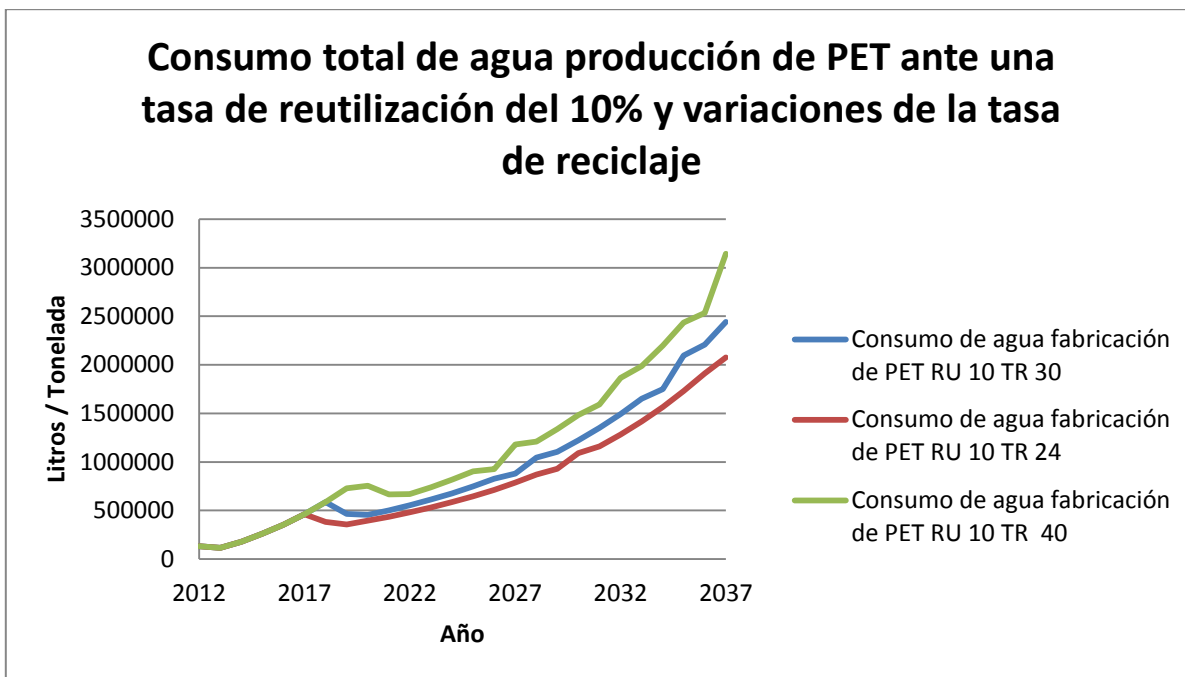


Fuente: Los autores

Dentro del trabajo de investigación se consideraron los efectos ambientales ocasionados por incrementos en la tasa de reutilización de PET. En las gráficas 16 y 17 se puede observar que los consumos de agua continúan siendo superiores a medida que la tasa de reciclaje aumenta, esto debido a que para el lavado del material a reutilizar se requiere el uso de agua y el reciclaje de PET consume una cantidad de agua superior a la producción de PET virgen.

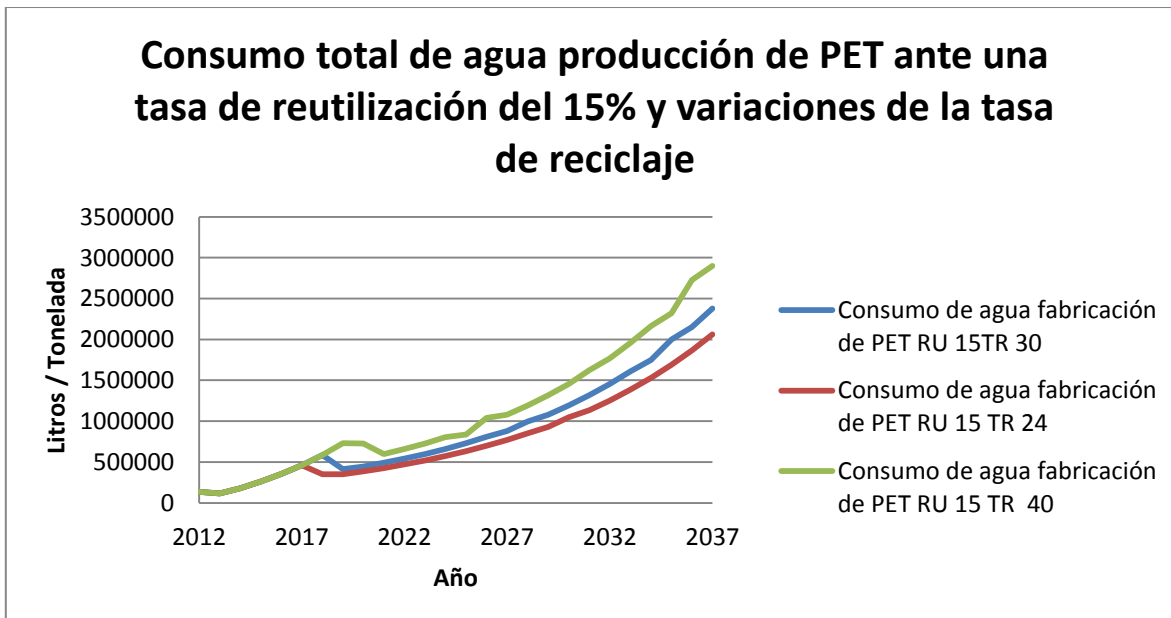
El comportamiento del consumo de energía también es similar al observado en el modelo inicial debido a que la reutilización de envases no requiere uso de electricidad para su reintroducción al ciclo productivo.

Gráfica 16. Consumo total de agua producción de PET ante una tasa de reutilización del 10% y variaciones de la tasa de reciclaje.



Fuente: Los autores

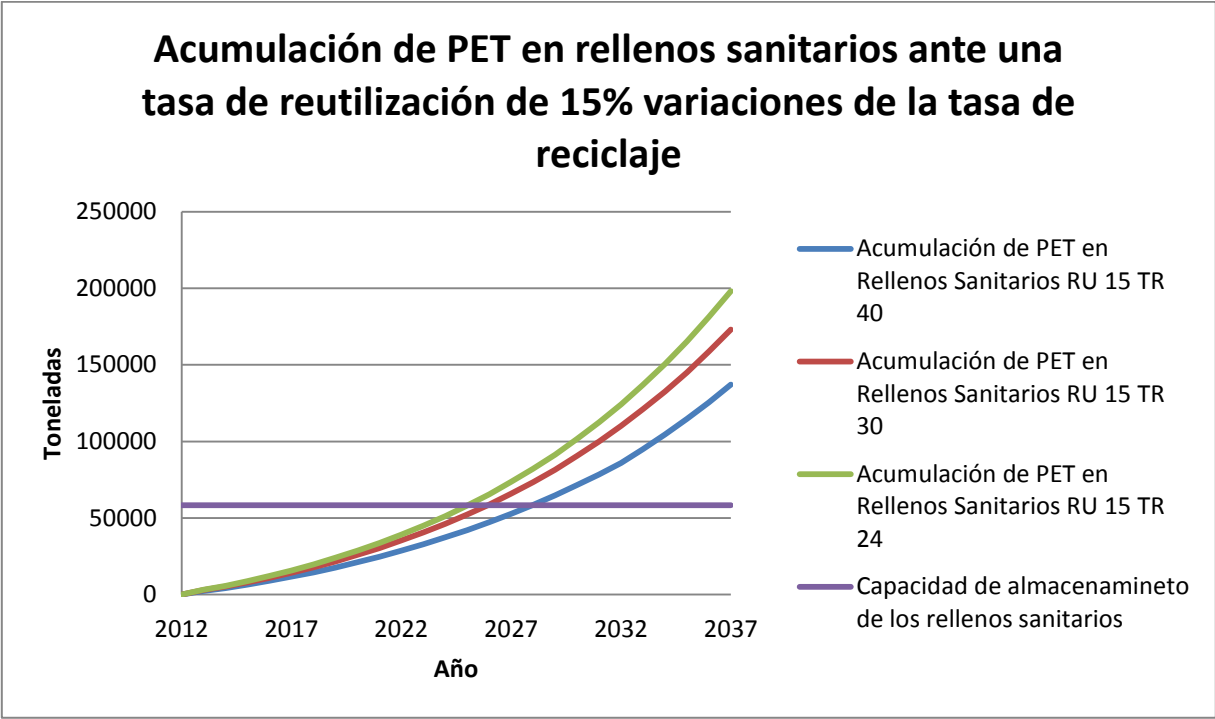
Gráfica 17. Consumo total de agua producción de PET ante una tasa de reutilización del 15% y variaciones de la tasa de reciclaje.



Fuente: Los autores

Un efecto positivo de la reutilización de envases se puede observar en la disminución de los residuos dispuestos en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto. Comparando las gráficas 9 y 18 se puede evidenciar que al aumentar la tasa de reutilización de PET se disminuyen las cantidades de residuos cuyo destino final son los rellenos , permitiendo prolongar por periodos entre uno y dos años la capacidad de almacenamiento de los rellenos sanitarios.

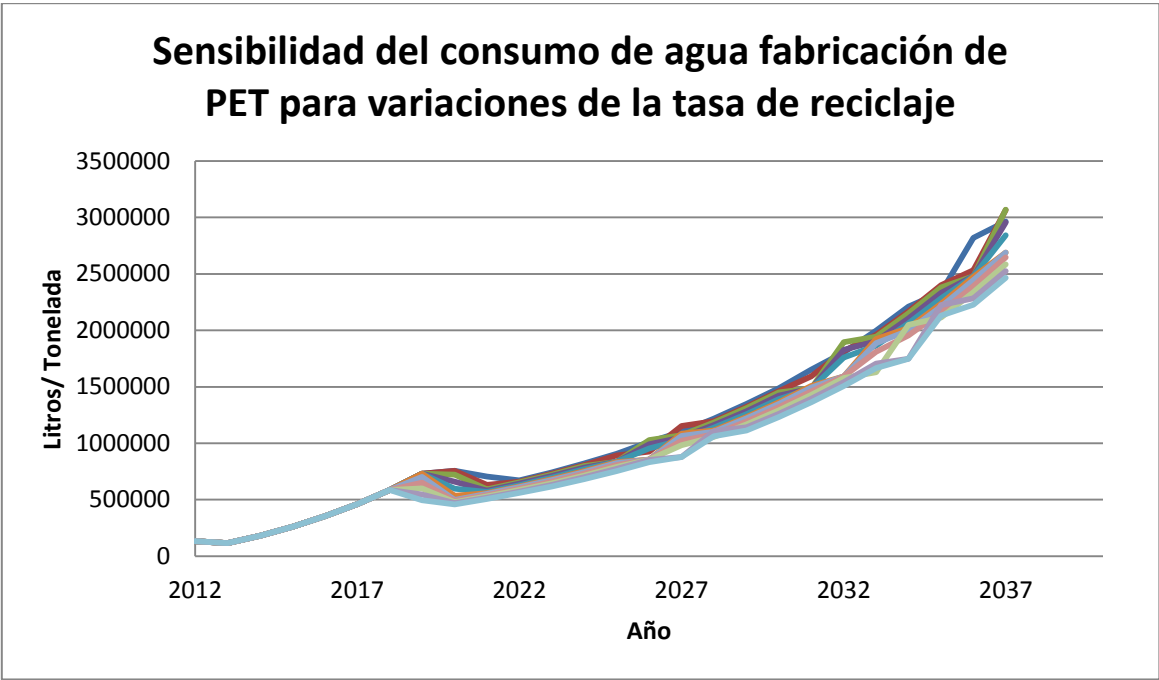
Gráfica 18. Acumulación de PET en rellenos sanitarios ante una tasa de reutilización del 15% y variaciones de la tasa de reciclaje.



Fuente: Los autores

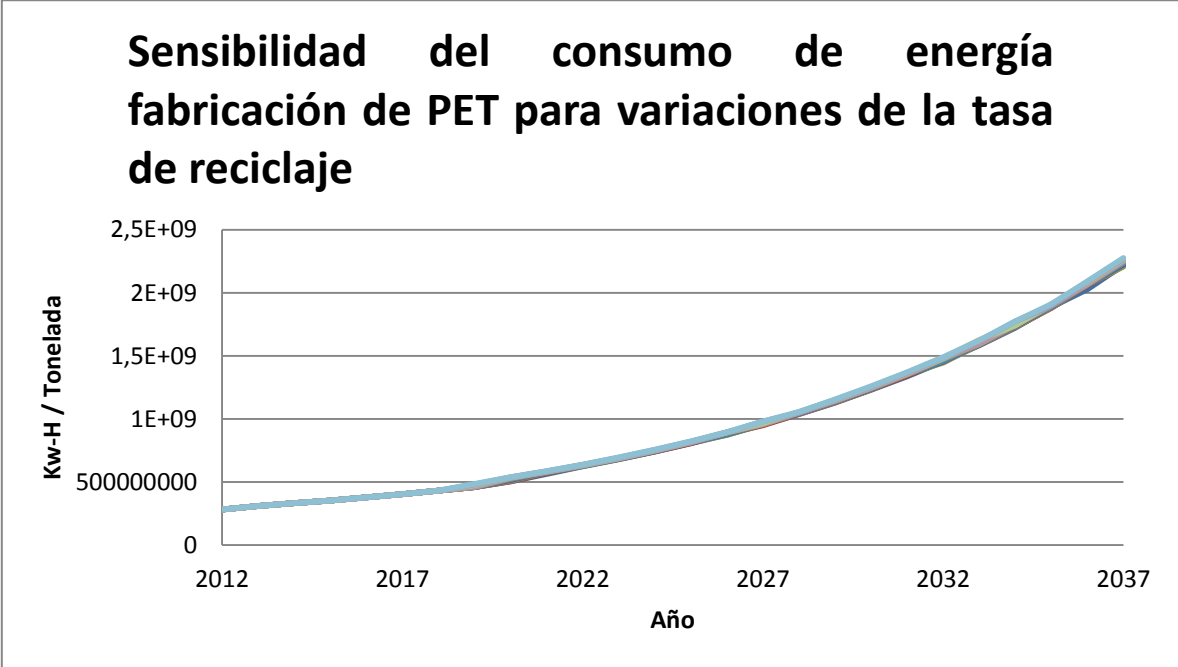
Por último se realizó la simulación del comportamiento de la tasa de reciclaje a partir de un valor inicial que varía en un rango de 30% y 40% con incrementos del 1%. En las gráficas 19, 20, 21 y 22 se puede observar el comportamiento del consumo de agua, consumo de energía, acumulación de PET en rellenos sanitarios y en botaderos a cielo abierto, como se puede observar el comportamiento de estas variables presenta la misma tendencia que los datos en la simulación inicial.

Gráfica 19. Sensibilidad del consumo de agua fabricación de PET para variaciones de la tasa de reciclaje



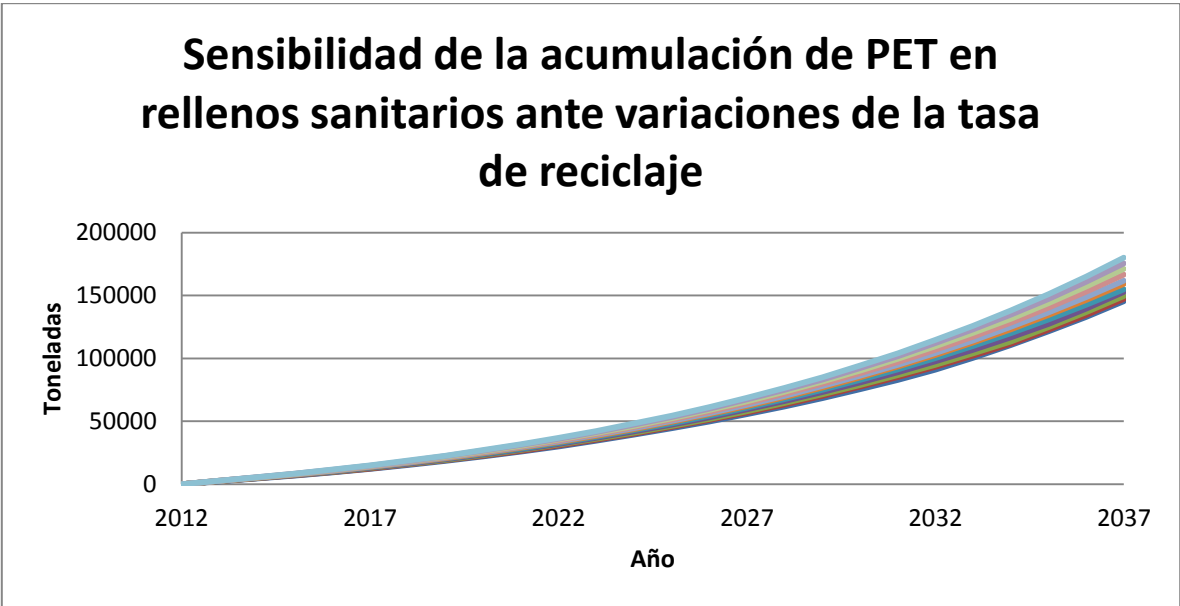
Fuente: Los autores

Gráfica 20. Sensibilidad del consumo de energía fabricación de PET para variaciones de la tasa de reciclaje.



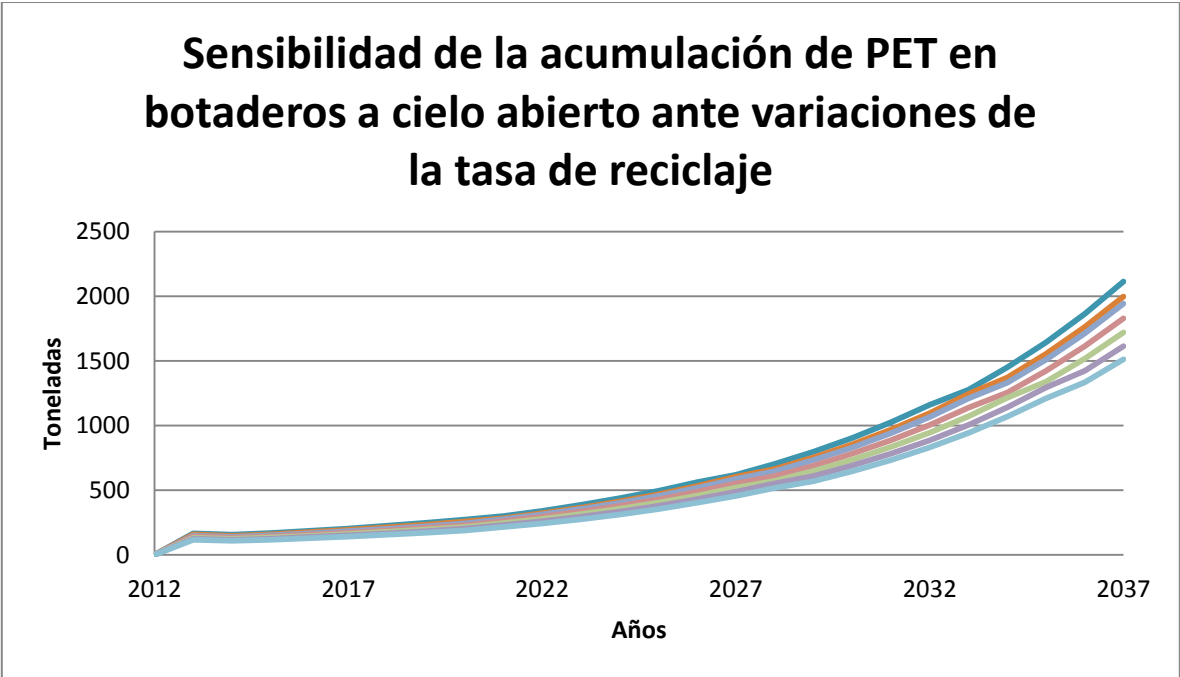
Fuente: Los autores

Gráfica 21. Sensibilidad de la acumulación de PET en rellenos sanitarios ante variaciones de la tasa de reciclaje



Fuente: Los autores

Gráfica 22. Sensibilidad de la acumulación de PET en botaderos a cielo abierto ante variaciones de la tasa de reciclaje



Fuente: Los autores

4. CONCLUSIONES

El impacto ambiental asociado al PET es una problemática derivada de las nuevas tendencias de consumo y la poca conciencia social que a nivel nacional y departamental hay con respecto al reciclaje de estos materiales, por lo que es importante que el gobierno se apropie de la problemática definiendo políticas contundentes y realizables frente a la generación y manejo de los residuos. Ya que en un escenario moderado podrían aprovechar adicionalmente 4.000 toneladas de PET anuales y en uno optimista esta cantidad se aproximaría a las 7.000 toneladas; sin embargo, estas metas solo serán posibles si a nivel nacional se hace obligatorio el reciclaje de residuos y se desarrolla un esquema de recolección selectivo con una adecuada estructura técnica y administrativa, que involucre todos los agentes de la cadena

Se hace necesario que los consumidores modifiquen sus formas actuales de consumo haciéndose conscientes de que sus actos afectan el medio en el cual subsisten y que de esto depende no solo su subsistencia sino también la de las próximas generaciones.

Los programas nacionales y departamentales para la gestión de residuos deben apuntar principalmente a crear una cultura de reciclaje domiciliario, separación en la fuente, diseño y creación de sistemas de recolección y estaciones de transferencia para la transformación de los residuos en materiales aprovechables y además propiciar la incorporación de los mismos al ciclo económico productivo.

El reciclaje es una alternativa de manejo de recursos que permite reducir los costos en la gestión de residuos minimizando los efectos en la salud de las personas generados por alternativas de disposición como los rellenos sanitarios y botaderos a cielo abiertos, además genera empleos directos e indirectos a lo largo de toda la cadena mejorando las condiciones de vida de los pobladores.

La aplicación de técnicas como el reciclaje para el manejo de residuos permite disminuir la cantidad de basura dispuesta en rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, la cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera, la dependencia de materias primas derivadas de recursos no renovables y representa ventajas industriales al disminuir el uso de energía para la obtención de productos; sin embargo, representa efectos adversos al medio ambiente ya que requiere mayores cantidades de agua para su tratamiento, incrementando la contaminación en fuentes hídricas lo que sugiere la posibilidad de hacer una evaluación multicriterio como complemento al estudio, para valorar si de manera global el impacto es positivo o no para el medio ambiente.

El modelo desarrollado en esta investigación puede ser utilizado para medir el impacto ambiental de otro tipo de materiales o incluir dentro de su estructura

variables que no fueron consideradas dentro de este trabajo. Adicional a esto sirve para establecer un precedente sobre los efectos positivos y negativos que alternativas de gestión de residuos como el reciclaje pueden tener sobre el medio ambiente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. F. Mothon, A. R. Balnco, G. Acevedo y J. Miller, «Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible,» Agosto 2002. [En línea]. Available: http://www.minambiente.gov.co/documentos/manual_evaluacion.pdf. [Último acceso: 25 Enero 2012].
- [2] Ministerio de Ambiente, Viviend y Desarrollo territorial, «Guia ambiental sector plásticos,» Bogotá Colombia, 2004.
- [3] J. M. Arandes, J. Bilbao y D. Lopés, «Reciclaje de Residuos Plásticos,» *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 5, Marzo 2004.
- [4] D. Gómez Orea, *Evaluación del impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión*, Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa, 2002.
- [5] J. Uso Domenech y J. Mateu Mahiques, *Teroia del medio ambiente modelización*, 2004.
- [6] C. P. d. I. S. y. C. Ambientales, «Que es un botadero de basura a cielo abierto o basurero,» 2012.
- [7] I. E. M. Beltran, «Relleno Sanitario,» [En línea]. Available: <http://relleno.galeon.com/>. [Último acceso: 23 12 2013].
- [8] G. m. a. c. poblados, «Informe sobre generación de residuos sólidos en el departamento del Valle del Cauca,» Santiago de Cali, 2012.
- [9] Red de Desarllo Sostenible de Colombia, «Comunidad de Gestión Ambiental,» 24 Mayo 2004. [En línea]. Available: <http://www.rds.org.co/gestion/>.. [Último acceso: 24 Abril 2012].
- [10] A. López y T. S. Carola, *La gestión de la logística reversiva*, Santiago de cali,] 2009.
- [11] CEMPRE, 26 Septiembre 2011. [En línea]. Available:] <http://www.cempre.org.co/Documentos/Ficha%20Plásticos.pdf>. [Último acceso: 24 Mayo 2012].
- [12] R. Cuberos Mejia, *Ambiente y confortabilidad en el ambito urbano: Unidad III - Impacto Ambiental y Reglamentación ambiental*, Universidad de Zulia- Facultad de arquitectrua y diseño, 2008.
- [13] M. Guido Perez, «Estudios de impacto ambiental con modelos de simulación,»] *Dinamica de Sistemas*, 2008.
- [14] R. Quiroga, *Indicadores ambientales y desarrollo sostenible*, Santiago de] Chile, 2007.
- [15] U. N. d. Colombia, «Estudios de Impacto Ambiental,» 2012. [En línea].

-] Available:
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/mtria_amb/2019519/und_2/html/contexto.html. [Último acceso: 27 Enero 2014].
- [16 O. d. I. N. U. p. I. A. y. I. Agricultura, «FAO,» [En línea]. Available:
] <http://www.fao.org/docrep/016/i2802s/i2802s.pdf>. [Último acceso: 05 Marzo 2014].
- [17 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*, Bogota, 2010.
- [18 V. y. D. T. Ministerio de Ambiente, «ANLA, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales,» 2011. [En línea]. Available:
] <http://www.anla.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=8052&catID=1373>. [Último acceso: 27 Enero 2014].
- [19 J. w. Forredter, *Dinámica Industrial*, Buenos Aires: Editorial Ateneo, 1981.
]
- [20 L. Rodriguez, N. Gonzales, L. Reyes y A. Torres, «Sistema de gestión de residuos eléctricos y electrónicos. Enfoque de dinámica de sistemas,» *Revista S&T*, nº 24, pp. 39-53, 2011.
- [21 O. Vasquez, «Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile,» *Revista de dinamica de sistemas*, vol. 1, nº 1, pp. 27-52, 2005.
- [22 M. Sufian y B. Balab, «Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city,» *Waste Management*, vol. 27, nº 7, pp. 858-868, 2007.
- [23 B. Dyson y N.-B. Chang, «Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling,» *Waste Management*, vol. 25, nº 7, pp. 669-679, 2005.
- [24 N. Kollikkathara, H. Feng y D. Yu, «A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues,» *Waste Management*, vol. 30, nº 11, pp. 2194-2293, 2010.
- [25 S. Cloetingh, «Perspectives on Environmental Earth System Dynamics,» *Global and Planetary Change*, vol. 27, nº 1-4, pp. 1-21, 2000.
- [26 G. Ye, H. Yuan, L. Shen y H. Wang, «Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 62, pp. 56-63, 2012.
- [27 J. A. Amézquita López, Modelamiento de cadenas agroindustriales mediante

-] simulación de redes, Cartagena, 2006.
- [28 C. Goyhenecha y L. Caro, «Diagramas de Forrester: "El diagrama característico de la dinámica de sistemas",» Santiago de Chile, 2006.
- [29 Aluna Consultores,, «Estudio nacional del reciclaje y los recicladores: Consideraciones sobre los precios del material reciclado,» 2011.
- [30 Instituto Tecnológico de Plásticos, AIMPLAS, «Situación actual y perspectiva del uso de PET reciclado para envases en contacto con Alimentos,» *Virtual-Pro*, vol. 1, pp. 19-27, Junio 2008.
- [31 M. N. Ortega, «El reciclaje de PET está en su mejor momento,» *Tecnología del plástico*, vol. 26, nº 4, pp. 12-16, Agosto/Septiembre 2011.
- [32 Asociación Nacional de Envases PET, «ANEP,» 1986. [En línea]. Available: <http://www.anep-pet.com/>. [Último acceso: 17 Noviembre 2012].
- [33 AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico, «Situación actual y perspectivas del uso del PET reciclado para envases en contacto con alimentos: Fase 1,» *Virtual-PRO*, nº 111, pp. 11-12, 2011.
- [34 Tecnología del PLÁSTICO, «Tecnología del PLÁSTICO:,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://www.plastico.com>. [Último acceso: 27 Noviembre 2013].
- [35 A. Arosti, M. Fernandez, G. Fernandez, A. Nonzioli, A. MoseR, E. Alonso, M. Cremona y M. Rivera, «Envases alimentarios fabricados a partir de PET reciclado: validación de las tecnologías y aptitud sanitaria de los productos,» *INTI: 6° Jornada de desarrollo e innovación tecnológica*, 2007.
- [36 Plastic Waste Management Institute, PWMI, «An introduction to plastic recycling,» *Virtual-Pro*, vol. 1, p. 35, Julio 2010.
- [37 B. Fletcher, Mackay y Michael, «"A model of plastics recycling: does recycling reduce the amount of waste?"»,» *El SEVIER*, Agosto 2003.
- [38 G. Karayannidis y D. Achilias, «Chemical Recycling of Poly (ethylene terephthalate),» *Macromolecular Journals*, pp. 128-146, Febrero 2007.
- [39 D. Nikles y M. Farahat, «New motivation for the depolymerization products derived from poly (ethylene terephthalate)(PET) waste: a review,» *Macromolecular materials and Engineering*, vol. 290, nº 1, pp. 13-30, Enero 2005.
- [40 C. N. d. I. R. d. C. *LEY 09*, Santa Fé de Bogotá D.C, 1997.
-]
- [41 P. d. I. R. d. C. *Decreto 3075*, Santa Fé de Bogotá, 1997.
-]
- [42 J. Aracil y F. Gordillo, *Dinámica de Sistemas*, Madrid: Alianza Editorial, 1997.

]

[43 PETRECOL S.A, «Informe sobre consumo de PET en el Valle del Cauca,»
] Zona Industrila Acopi-Yumbo, 2013.

[44 M. N. Ortega, «El reciclaje de PET está en su mejor momento,» *Tecnología del*
] *plastico*, vol. 26, nº 4, pp. 12-16, Agosto/Septiembre 20011.

[45 M. Martínez y C. A. Flores, *Depósito reembolso, herramienta para impulsar el*
] *cuidado ambiental y el desarrollo económico de México*, Jalisco, 2008.

[46 Corporación Ambiental Empresarial , «CAEM,» [En línea]. Available:
] http://www.caem.org.co/documentos/600_GUIA_METODOLOGICA_PLASTICOS.pdf- Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector: Plástico. [Último acceso: 27 Octubre 2013].

[47 A. Firas y P. Dumitru, «Recycling of PET,» *European Polymer Journal*, pp.
] 1453-1477, 2005.

[48 Diario El Tiempo, «El tiempo.com,» [En línea]. Available:
] <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-756352>. [Último acceso: 30 Noviembre 2013].

[49 C. E. Ocampo, A. Pradilla y M. Fabian, «Impacto de un depósito de residuos
] sólidos en el crecimiento físico infantil,» *Colombia Médica*, vol. 39, nº 3, 2008.

[50 M. Cashmore, «The role of science in environmental impact assessment:
] process and procedure versus purpose in the development of theory,» vol. 24,
nº 4, 2004.

[51 J. Toro, «Análisis comparativo de metodologías de evaluación de impacto
] ambiental y su implementación en diferentes en diferentes actividades
humanas: Caso Colombia,» DEA, Universidad de Granada, España, 2007.

[52 S. Montaz, «Environmental impact assessment in Bangladesh: A critical
] review,» vol. 22, nº 2, 2002.

[53 A. C. Ltda, Noviembre 2012. [En línea]. Available: www.cempre.org.co.

]

[54 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Manual general para*
] *la presentacion de estudios ambientales*, 2010.

[55 Amigos de la tierra, «AMIGOS DE LA TIERRA,» [En línea]. Available:
] www.amigosdelaterra.org.com. [Último acceso: 25 Noviembre 2012].

[56 S. Martínez y A. Raquema, *Simulación dinámica por ordenador*, Madrid:
] Alianza editorial, 1998.

[57 J. Forrester, «Industrial dynamics:A major breakthrough for decision makers,»
] *Harvard Bussines*, nº 36, pp. 37-66, 1958.

- [58 International Life Sciences Institute, «Recycling of plastics for food contact use,» *Virtual Pro*, vol. 1, n° 5, p. 11, 2011.
- [59 Asociación Nacional del Envase de PET, «ANEP,» Noviembre 1997. [En línea]. Available: http://anep-pet.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2. [Último acceso: 10 Junio 2013].
- [60 J. w. Forrester, *Dinámica Industrial*, Buenos Aires: Editorial Ateneo, 1981.
- [61 G. Arrieta Benarte, Junio 2008. [En línea]. Available: www.miniambiente.org.com.
- [62 Superintendencia de Servicios Públicos, «Estudio Sectorial de Aseo,» Bogotá, 2011.
- [63 G. A. Salinas y A. Victoria, *Análisis del impacto del uso de materia prima reciclada en la gestion de inventarios mediante dinámica de sistemas*, 2011.
- [64 C. Meñeca, S. Prieto y Á. Mena, Octubre 2009. [En línea]. Available: www.uis.edu.co.
- [65 R. Rehan, M. Knight, C. Haas y A. Unger, «Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems,» *Water Research*, n° 1, Julio 2011.
- [66 W.-K. Fong, H. Matsumoto y Y.-F. Lun, «Application of System Dynamics model as decision making tool in urban planning process toward stabilizing carbon dioxide emissions from cities,» *Building and Enviroment*, n° 1, Julio 2008.
- [67 V. Karavezyris, K.-P. Timpe y u. Marzi, «Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste,» *Mathematics and Computers in Simulation*, n° 1, pp. 149-158, 2002.
- [68 PETRECOL S:A, «Informe sobre consumo de PET en el Valle del Cauca,» Zona Industrila Acopi-Yumbo, 2013.
- [69 O. d. I. N. U. p. a. A. y. I. Agricultura, «FAO,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/docrep/016/i2802s/i2802s.pdf>. [Último acceso: 05 Marzo 2014].