



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO Y AHORRO DE EMISIONES
DERIVADAS DEL RECICLAJE DE ENVASES PET FRENTE A LA
DISPOSICIÓN EN RELLENOS SANITARIOS, CON BASE EN LA
VALORACIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO EN ECUADOR

AUTORA

Estephany Belen Alcocer Tapia

AÑO
2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO Y AHORRO DE EMISIONES
DERIVADAS DEL RECICLAJE DE ENVASES PET FRENTE A LA
DISPOSICIÓN EN RELLENOS SANITARIOS, CON BASE EN LA
VALORACIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO EN ECUADOR

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en
Prevención y Remediación

Profesor Guía

MSc. Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Autora

Estephany Belén Alcocer Tapia

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido, Determinación del ahorro energético y ahorro de emisiones derivadas del reciclaje de envases PET frente a la disposición en rellenos sanitarios, con base en la valoración del ciclo de vida del producto en Ecuador, a través reuniones periódicas con la estudiante Estephany Belén Alcocer Tapia, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Daniel Hernán Hidalgo Villalba
Magister en Ciencias, Especialización Ingeniería Ambiental
C.I: 1801914449

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

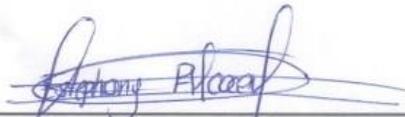
“Declaro haber revisado este trabajo, Determinación del ahorro energético y ahorro de emisiones derivadas del reciclaje de envases PET frente a la disposición en rellenos sanitarios, con base en la valoración del ciclo de vida del producto en Ecuador, de la estudiante Estephany Belen Alcocer Tapia, en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Marco Vinicio Briceño León
Máster en Energías Renovables
C.I: 1715967319

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

"Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citados las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes".



Estephany Belen Alcocer Tapia
C.I:1721138145

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones a lo largo de toda mi carrera universitaria; gracias a mis docentes Daniel Hidalgo y Marco Briceño por su guía y apoyo para la culminación de este trabajo de titulación; a todos mis amigos que conocí durante este largo proceso; y especialmente a mis padres Belen Tapia y Pabel Alcocer por su esfuerzo día a día, sin ellos nada de esto habría sido posible, gracias por todo su apoyo papitos.

DEDICATORIA

A mis padres Belen Tapia y Pabel Alcocer este trabajo de titulación representa el esfuerzo y la dedicación que han puesto, ellos han sido un pilar fundamental en mi vida; a mi novio Cristian que ha estado conmigo desde el inicio de este largo camino; a mi hermano que con sus ocurrencias me ha sacado sonrisas en los días difíciles; y a toda mi familia especialmente a mis abuelitos.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar el ahorro de emisiones de gasto energético y emisiones de carbono equivalente mediante un análisis del ciclo de vida de las botellas PET, enfocado en la fabricación de botellas de tereftalato de polietileno en la industria de bebidas carbonatadas aplicado al Ecuador. El alcance del ciclo de vida aplicado para el estudio es de la cuna a la puerta de fábrica mediante 4 diferentes escenarios.

La unidad funcional que se estableció fue de 12.58 kg de resina PET que produce 12.2 kg de botellas equivalente a 1000 botellas PET. El estudio cubrió las etapas de producción de resina virgen, producción de resina reciclada y transformación en botellas, los escenarios planteados fueron 100% resina virgen, 25% resina reciclada, 50% resina reciclada y 100% resina reciclada, donde se incluye la producción de botellas PET a partir de resina virgen por sustitución de resina PET reciclada de acuerdo con los escenarios propuestos.

Los datos de inventario del ciclo de vida fueron tomados de la base de datos de Ecoinvent data base 3.0. La evaluación del ciclo de vida se lo realizó mediante el software OpenLCA los métodos de impacto considerados para el estudio fueron Recipe Midpoint y Cumulative Energy Demand, se seleccionó la categoría de impacto referente a cambio climático que cuantificó las emisiones de CO_2eq y recursos energéticos no renovables.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que la producción de botellas con materia prima 100% virgen aporta con la mayor cantidad de emisión de gases en la categoría de cambio climático con un 69.2 kg de CO_2eq y un gasto energético en la categoría de recursos energético no renovables de 1843.7 MJ/1000 botellas, el mejor escenario propuesto fue el 4, compuesto por materia 100% reciclada con una emisión de 18.63 2 kg de CO_2eq y gasto energético en la categoría de recursos energético no renovables de 216.6 MJ/1000 botellas.

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate the savings in energy consumption and equivalent carbon emissions through a life cycle assessment of PET bottles, focusing on the manufacture of polyethylene terephthalate bottles in the carbonated beverage industry applied to Ecuador. The life cycle scope applied for the study is from the cradle to gate of the factory through four different scenarios.

The functional unit that was established was 12.58 kg of PET resin that produces 12.2 kg of bottles equivalent to 1000 PET bottles. The study covered the stages of production of virgin resin, production of recycled resin and transformation into bottles. The scenarios proposed were 100% virgin resin, 25% recycled resin, 50% recycled resin and 100% recycled resin, which included the production of PET bottles from virgin resin by substitution of recycled PET resin according to the proposed scenarios.

The life cycle inventory data was taken from the Ecoinvent database 3.0. The life cycle assessment was carried out using OpenLCA software. The impact methods considered for the study were Recipe Midpoint and Cumulative Energy Demand, the impact category referring to climate change was selected which quantified the emissions of CO_2eq and non-renewable resources - fossil.

The results obtained in this study showed that the production of bottles with 100% virgin raw material contributes with the highest amount of gas emissions in the category of climate change with 69.2 kg of CO_2eq and an energy expenditure in the category of the non-renewable energy resources - fossil of 1843.7 MJ/1000 bottles, the best scenario proposed was 4, composed of 100% recycled material with an emission of 18.63 2 kg of CO_2eq and energy expenditure in the category of non-renewable - fossil energy resources of 216.6 MJ/1000 bottles.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problemática.....	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Alcance	4
1.5. Justificación	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Análisis del Ciclo de vida de los productos.....	6
2.1.1. Metodología del Análisis del ciclo de vida.....	6
2.1.2. Definición del Objetivo y Alcance.....	7
2.1.3. Unidad Funcional.....	7
2.1.4. Límites del Sistema	7
2.1.5. Análisis del inventario	7
2.1.6. Evaluación del inventario del ciclo de vida.....	8
2.2. La cadena productiva de los envases PET	9
2.2.1. Fabricación de los envases PET.....	10
2.2.2. Procesos de Transformación de resinas PET	10
2.2.3. Moldeo por extrusión y soplado	11
2.2.4. Moldeo por Inyección y Soplado	12
2.2.5. Moldeo por Inyección Estirado y Soplado	13
2.3. Reciclaje de envases PET.....	14
2.4. Marco Normativo de Residuos Sólidos.....	15
2.4.1. Marco Normativo de gestión integral de plásticos en Ecuador	16
2.4.2. Normativa para uso de PET reciclado en la fabricación de botellas plásticas.....	17
2.5. Cadena productiva de envases PET en Ecuador	18

3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Ciclo productivo de los envases PET en Ecuador.....	21
3.2. Unidad Funcional.....	22
3.3. Límites del sistema.....	22
3.4. Escenarios para evaluar.....	23
3.4.1. Escenario1: Botella 100 % materia virgen.....	24
3.4.2. Escenario 2: Botella 25% reciclada.....	24
3.4.3. Escenario 3: Botella 50% reciclada.....	25
3.4.4. Escenario 4: Botella 100% reciclada.....	25
3.5. Transporte.....	26
3.6. Inventario del Ciclo de Vida de las botellas PET.....	28
3.6.1. Producción de resina PET grado botella virgen.....	29
3.6.2. Producción de resina PET reciclada grado botella.....	29
3.7. Evaluación del Inventario del ciclo de vida.....	31
4. RESULTADOS.....	32
4.1. Escenario 1: Botella 100% materia virgen.....	33
4.2. Escenario 2: Botella 25% reciclada.....	35
4.3. Escenario 3: Botella 50% reciclada.....	37
4.4. Escenario 4: Botella 100% reciclada.....	40
4.5. Comparación entre escenarios.....	42
4.5.1. Emisiones categoría cambio climático.....	42
5. DISCUSIÓN.....	48
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
6.1. Conclusiones.....	49
6.2. Recomendaciones.....	50
REFERENCIAS.....	51
ANEXOS.....	60

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La contaminación, tiene una larga data, cuyo notable crecimiento se experimentó con la llegada de la Revolución Industrial, que produjo la creación de grandes organizaciones y centros industriales, una rápida urbanización e incremento de las actividades comerciales; que a su vez; produjeron grandes cantidades de residuos sólidos (BID, 2017).

Se calcula que a nivel mundial se produce alrededor de 7000 a 10000 millones de toneladas de residuos sólidos (Ponce, 2015), en Ecuador en el año 2014 la generación de residuos fue de 4 millones de toneladas métricas al año, con una generación per cápita de 0.73 kg por día. de los cuales; el 61,4 % de estos residuos son orgánicos y 38.5% potencialmente reciclables (Ministerio del Ambiente, 2015). En el país de los 221 municipios,86 de los gobiernos autónomos descentralizados disponen sus residuos sólidos en rellenos sanitarios, 57 en botaderos controlados,52 en botaderos a cielo abierto y los 26 restantes en celdas emergente (INEC, 2014).

Entre los componentes de estos residuos, se encuentra los plásticos, la producción total de este material fue de 355 millones de toneladas para el año 2016 (Reinold, Herrera, Hernández, y Gómez, 2020), los mismos que tienen una larga historia y alta tasa de producción, es así que en el año de 1909 tiene lugar el primer plástico sintético obtenido a partir de la combinación de fenol y gas formaldehído con el cual se utilizó para la fabricación de carcasas de teléfonos y radios (García, 2009). Pero solo hasta el año de 1941, los inventores John Whinfield y James Dickson descubren el tereftalato de polietileno, sin embargo su producción industrial de fibra de poliéster comenzó en el año de 1955 (COBOS, 2016). El tereftalato de polietileno considerada una resina plástica usada generalmente para empaque de una variedad de productos entre los más destacados se encuentra las botellas plásticas para bebidas.

La producción mundial de tereftalato de polietileno es de 26 millones de toneladas por año, de los que el 30% es empleado en botellas de bebidas (Rorrer et al., 2019) de acuerdo al Ministerio de Ambiente en Ecuador en el 2012 se produjeron 1406 millones de botellas plásticas (Ministerio del Ambiente, 2012) lo que es un grave problema debido a su lenta degradabilidad cuya descomposición en rellenos sanitarios produce grandes cantidades de metano (Arandes Esteban, Bilbao Elorriaga, y López Valerio, 2004) lo que contribuye al cambio climático.

Para resolver los problemas asociados a los residuos de tereftalato de polietileno, se emplean diferentes alternativas tecnológicas, entre las cuales podemos mencionar la incineración para la generación de energía, que genera contaminación secundaria (Gere y Czigany, 2020), una alternativa a esta tecnología es el reciclaje mediante la reutilización de estos residuos PET, mismo que pueden ser mezclados con PET virgen para la generación de materia prima considerada sostenible y desviar de esta manera los residuos plásticos de rellenos sanitarios, para nuevamente reingresar a la cadena productiva (Gere y Czigany, 2020). Lo que generaría un ahorro de energía y disminución de gases de efecto invernadero.

Una Alternativa, a esta tecnología de incineración, puede ser el análisis de ciclo de vida que se basa principalmente en la estimación y evaluación de los impactos ambientales, donde se abarca los flujos de materia y energía dentro de los límites del sistema, donde calcula los impactos relevantes como emisiones de gases de efecto invernadero (Shen, Nieuwlaar, Worrell, y Patel, 2011). La presente investigación, propone determinar el impacto ambiental generado por el actual manejo integral de los envases PET, contemplando las etapas del ciclo productivo como: importación, producción, reciclaje y disposición final utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta para la determinación de ahorro energético y emisiones derivadas.

1.2. Problemática

La generación de residuos sólidos en el Ecuador se estima en 4'139.512 Tm/año los que se disponen solo el 20% en rellenos sanitarios y el 80% restante en botadores (Ministerio del Ambiente, 2020), de los que el 25% son residuos considerados reciclables, pero solo el 7% son recuperados. De acuerdo a cifras definidas por el Ministerio de Ambiente el plástico representa el 11% los residuos sólidos no biodegradables, cuya descomposición es lenta, se estima que cada ecuatoriano consume alrededor de 20 kg de plástico al año (El Telégrafo, 2019) de manera que se han incrementado en los últimos años los residuos de envases plásticos debido especialmente a la fabricación de productos, lo que conlleva grandes acumulaciones en el ambiente. Por tal motivo, hay la necesidad de implementar procesos eficientes, por lo que es elemental establecer las etapas de producción, consumo, gestión de residuos y reciclaje de los envases PET, por medio del análisis del ciclo de vida para la valoración de ahorro energético y emisión de gases.

De acuerdo con estudios realizados han informado sobre la evaluación del ciclo de vida, en el que determinaron la carga ambiental de las botellas de tereftalato de polietileno en el estado de California, en el cual analizaron cada etapa entre las que se menciona la producción de materiales, producción de botellas y gestión de residuos donde concluyeron que la producción de botellas PET con una unidad funcional de 1000 unidades de botellas PET de 400ml, contribuye 81.9 kg de carbono equivalente, en el escenario de reciclaje obtuvieron un beneficio ambiental ahorrando 52.3 kg de carbono equivalente (Kang, Auras, y Singh, 2017). En otro estudio realizado estimaron que se genera 3.6 millones de toneladas de carbono equivalente por incineración a partir de 2.7 millones de toneladas de desechos plásticos en Corea del Sur, determinaron que 6.6 millones de toneladas de carbono equivalente se podría evitar mediante el reciclaje en el que el consumo per cápita de botellas PET es de 11.8 Kg (Jang, Lee, Kwon, Lim, y Jeong, 2020)

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General.

- Evaluar el ahorro energético y ahorro de emisiones de carbono equivalente derivados del proceso de reciclaje de envases PET, en base a la valoración del ciclo de vida del producto en Ecuador.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Establecer el ciclo productivo y el ciclo de vida de los envases PET en el Ecuador.
- Valorar la generación de emisiones y gasto energético frente al manejo integrado de residuos, mediante la sustitución de resina PET por material reciclado.

1.4. Alcance

En el presente estudio, se llevará a cabo una investigación de tipo bibliográfica con información secundaria obtenida del Banco Central del Ecuador referente a importaciones, INEC, generación de residuos, SRI, y otras entidades competentes, para sobre esta base, determinar el ahorro energético y ahorro de carbono equivalente derivados del proceso de reciclaje de envases PET, mediante la determinación del ciclo productivo y ciclo de vida del producto en Ecuador, por lo que se plantea analizar 4 diferentes escenarios orientados en la fase final de la vida útil de los envases PET, donde se incluye la producción a partir de resina PET virgen y por sustitución de resina por PET reciclado, para el cálculo del ahorro energético y emisión de gases por comparación de los 4 escenarios.

1.5. Justificación

El crecimiento poblacional y el desarrollo socioeconómico representan un reto especialmente para los países en vías de desarrollo por la creciente contaminación, en la actualidad la generación de residuos a nivel mundial es de 17 millones de toneladas anuales (Yuridia et al., 2017), En Ecuador la generación aproximada de residuos sólidos en el año 2012 fue de 4 millones de toneladas métricas, lo que representa una generación per cápita de 0.73 kg/hab/día (INEC, 2018), el inadecuado manejo de los residuos sólidos se evidencia principalmente en el deterioro de los recursos agua, suelo y aire. A nivel nacional la cobertura de los servicios de recolección y disposición final de los residuos sólidos es de un 80,45%, de los que el 43% se los dispone en rellenos sanitarios, el 11% representan residuos plásticos (Ministerio del Ambiente- PNGIDS, 2013) entre los que se encuentra botellas plásticas, su uso está relacionada con la explotación de recursos no renovables, siendo el petróleo su fuente principal de materia prima.

Dentro de la gama de los plásticos con alto uso comercial se encuentra el tereftalato de polietileno PET, en el año 2007 se reportó un consumo anual de 10 millones de toneladas el que va en aumento un 15% cada año (Quintero, Berdugo, y Simancas, 2017) por ser uno de los materiales más usados por la industria para embotellar bebida, debido principalmente a su durabilidad, lo que causa problemas de contaminación, produciendo grandes cantidades de CO_2 , el principal gas de efecto invernadero y el principal responsable del cambio climático, por lo que la gestión adecuada de este tipo de residuos es de vital importancia, sin embargo existen alternativas para este tipo de desechos como el empleo de los desechos post consumo para su reincorporación al ciclo productivo en la fabricación de nuevos polímeros plásticos, lo que se podría reducir hasta un 72% de las emisiones de CO_2 (Valderrama, Guzmán, Osorio, y Peña, 2018).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Análisis del Ciclo de vida de los productos

Es una metodología para evaluar la carga ambiental asociada a un producto, proceso o actividad durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas, producción, distribución, hasta la disposición final y la posible reutilización y reciclaje, evaluando los residuos liberados al ambiente durante todo el proceso (Cardona, 2012). El análisis del ciclo de vida es un medio que ayuda a identificar y cuantificar los impactos ambientales causados por un producto, en cada una de las etapas de su ciclo de vida. El análisis del ciclo de vida es un instrumento para la toma de decisiones sobre la optimización del sistema productivo, para adoptar políticas y prácticas que mejoren la sostenibilidad de los productos (Matouq, 2000)

2.1.1. Metodología del Análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida comprende una serie de fases, que deben seguir una secuencia definida, de acuerdo con la ISO 14040, donde constan cuatro fases:

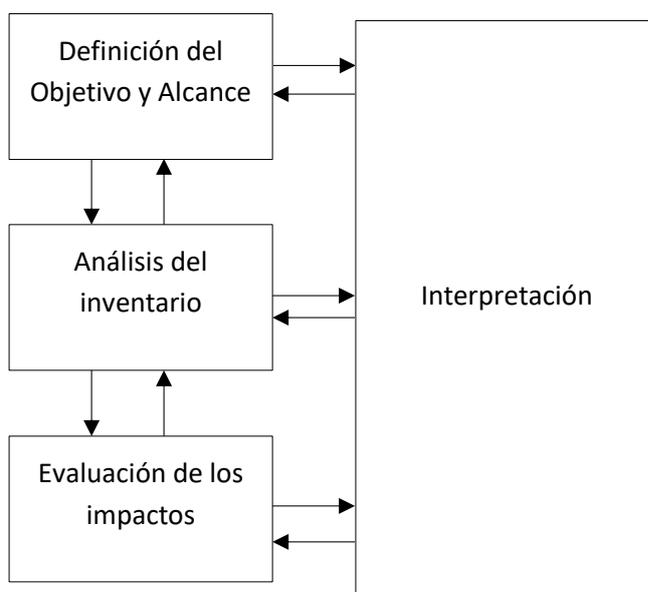


Figura 1. Fases del análisis del ciclo de vida de acuerdo con la norma ISO 14040.

2.1.2. Definición del Objetivo y Alcance

Fase en la que se definen los motivos para el desarrollo del estudio, estableciéndose la finalidad del estudio y el alcance, que radica en la definición de la profundidad del estudio y que debe incluir: la descripción del sistema del producto, funciones del sistema, límites del sistema, unidad funcional y calidad de los datos (Andrés Olivera, Cristobal, y Saizar, 2016). El Alcance del estudio deberá ser bien definido para asegurar que la profundidad y el detalle del estudio sean compatibles y suficientes para cubrir el objetivo establecido

2.1.3. Unidad Funcional

La unidad funcional se considera un elemento importante del análisis del ciclo de vida, es la medida de referencia para las entradas y salidas del sistema permitiendo la comparación de dos sistemas diferentes evaluando en función de una sola unidad conocida (European Commission, 2004).

2.1.4. Límites del Sistema

Los límites del sistema consideran los procesos unitario y dependen principalmente del objetivo y alcance del estudio, que tiene en cuenta desde la extracción de materias primas, producción, distribución, transporte hasta la generación de residuos y recuperación de materiales (European Commission, 2004).

2.1.5. Análisis del inventario

El análisis del inventario engloba la obtención de datos para cuantificar las entradas y salidas de un sistema, se contemplan los flujos de materia y energía para cada operación unitaria, tales como el uso de energía, materias primas combustibles fósiles. Las salidas cuantificadas incluyen las emisiones al aire, agua, suelo y residuos generados (Cardona, 2012), los datos deben ser expresados tomando en cuenta la unidad funcional del estudio. Esta fase es un

procedimiento iterativo, a medida que se recopilan datos se conoce más el sistema

2.1.6. Evaluación del inventario del ciclo de vida

La etapa de evaluación de impactos consiste en valorar la significancia y magnitud de los impactos ambientales generados durante todo el sistema, usando los resultados del análisis del inventario, esta fase tiene el objetivo de suministrar información adicional para evaluar los resultados obtenidos en la fase de inventario del ciclo de vida (Niembro y Gonzalez, 2008) Durante la evaluación de impactos se aplica un método para evaluar los datos obtenidos durante el análisis del ciclo de vida en resultados de índole ambiental, los elementos obligatorios de esta fase son la selección de categoría de impactos e indicadores de categoría. La categoría de impactos considerados en un estudio está relacionada con la utilización de recursos y las emisiones de gases (Comisión Europea, 2013) el indicador de categoría de impacto es la representación cuantitativa de la categoría de impacto que se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 1

Categorías e indicadores de impacto

Categorías de Impacto	Indicadores de la categoría de impacto
Cambio climático	Kg CO ₂ eq
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq
Ecotoxicidad Marina	Kg DB eq
Radiación Ionizante	Kg U235 eq
Eutrofización acuática	Kg N eq
Agotamiento del agua	m ³
Agotamiento recursos fósiles	Kg oil eq
Ocupación del suelo	m ₂ × a
Agotamiento de minerales	Kg Fe eq
Toxicidad Humana	Kg 1,4 DB eq
Ocupación de tierras agrícolas	m ₂ × a
Formación de material particulado	Kg PM10 eq
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq

Tomado de (Andrés Olivera et al., 2016).

2.2. La cadena productiva de los envases PET

El poli (tereftalato de etileno) abreviado como PET es un polímero termoplástico, que pertenece a la familia de los poliésteres, se produce a partir de la esterificación con etilenglicol y el ácido tereftálico continuando con una reacción de transesterificación entre el dimetil tereftalato y etilenglicol que se esquematiza el proceso a continuación (COBOS, 2016).

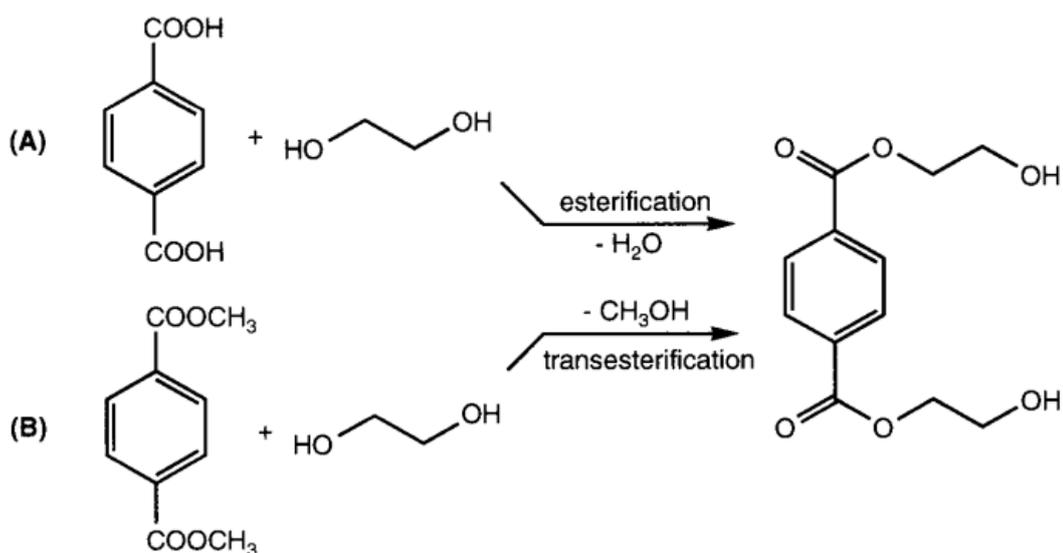


Figura 2. Reacción de Esterificación y Transesterificación.

Tomado de (Lepoittevin y Roger, 2011).

Para el proceso de transesterificación con tereftalato de dimetilo y etilenglicol a temperaturas de 150 a 210°C, se agrega un catalizador como Antimonio o Manganeso, durante la reacción se genera metanol y se obtiene un monómero bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato (Lepoittevin y Roger, 2011)

El bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato se calienta a 300° C, pasa por una matriz por presión que ejerce el nitrógeno que da lugar a fibras que caen al agua se enfrían (Lepoittevin y Roger, 2011). Las fibras obtenidas pasan por el proceso que las convierte finalmente en pellets, transparentes y amorfos de baja viscosidad y bajo peso molecular, para la producción de botella se requiere el proceso de cristalización a temperaturas entre 130 a 160° C durante 60 minutos que pasa

de 1.33 g/cm^3 grado amorfo a 1.4 g/cm^3 grado cristalino (COBOS, 2016), mediante movimientos mecánicos aumentando la densidad del PET, eliminando el agua, acetaldehído y polvo de polímero, siguiente a la polimerización en estado sólido, los gránulos pasan a un reactor de forma a temperaturas que varían entre 215 y 240°C con flujo de nitrógeno (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2007) lo que conlleva al aumento del peso molecular que da como resultado la resina PET grado botella con una cristalinidad superior al 50% (COBOS, 2016).

2.2.1. Fabricación de los envases PET

El proceso inicia con el secado de la resina PET, la mayoría de las resinas son materiales higroscópicos que absorben humedad del medio ambiente, un contenido de humedad alto puede ocasionar problemas durante el proceso de fabricación de los envases plásticos, provocando productos de baja calidad, la resina de PET debe ser secada antes de cualquier proceso para así evitar la degradación hidrolítica provocando que las cadenas poliméricas se hidrolicen y como efecto disminuya la viscosidad de la resina, el nivel de contenido de agua debe ser el menor al 0,02% (Lepoittevin y Roger, 2011). El secado de resinas se lleva a cabo por medio de un contenedor con humedad relativa muy baja, causando que el material libere su humedad al aire de secado que se recircula durante todo el proceso, el método de secado más utilizado es el secado con aire seco y/o caliente que tiene una estrecha relación entre la humedad del material y el tiempo de secado (Hernandez, 2013).

2.2.2. Procesos de Transformación de resinas PET

Los procesos de transformación de resinas PET se los realiza generalmente en estado fundido para generar artículos huecos como botellas para líquidos y se compone por tres tipos de procesos básicos como

- Moldeo por extrusión y soplado
- Moldeo por Inyección
- Moldeo por Inyección estirado y soplado

2.2.3. Moldeo por extrusión y soplado

El proceso de extrusión se utiliza en la industria de plásticos para la producción de piezas huecas obteniendo finalmente las preformas. El proceso consisten de una extrusora compuesta de un cilindro y un tornillo, la resina PET se carga mediante una tolva llegando al cilindro y posteriormente el tornillo introduce el material, lo trasporta hacia la parte delantera y lo comprime (Beltrán y Marcilla, 2012) el material finalmente se funde y plastifica hasta llegar a la boquilla y recibe la forma de una preforma también llamado “parisón”, el mismo queda pendiendo hacia abajo pasando a un molde de soplado como se indica en la Figura 3, el molde está compuesto de dos partes con la forma de la pieza a moldear, las dos mitades del molde se cierran desplazándose hacia la unidad de soplado, el cabezal de soplado penetra al molde llegando hasta la preforma insuflando aire, la presión causa que la preforma tome la forma del molde y finalmente la pieza se enfría se abre el molde y se expulsa el producto final (Vlachopoulos y Strutt, 2003).

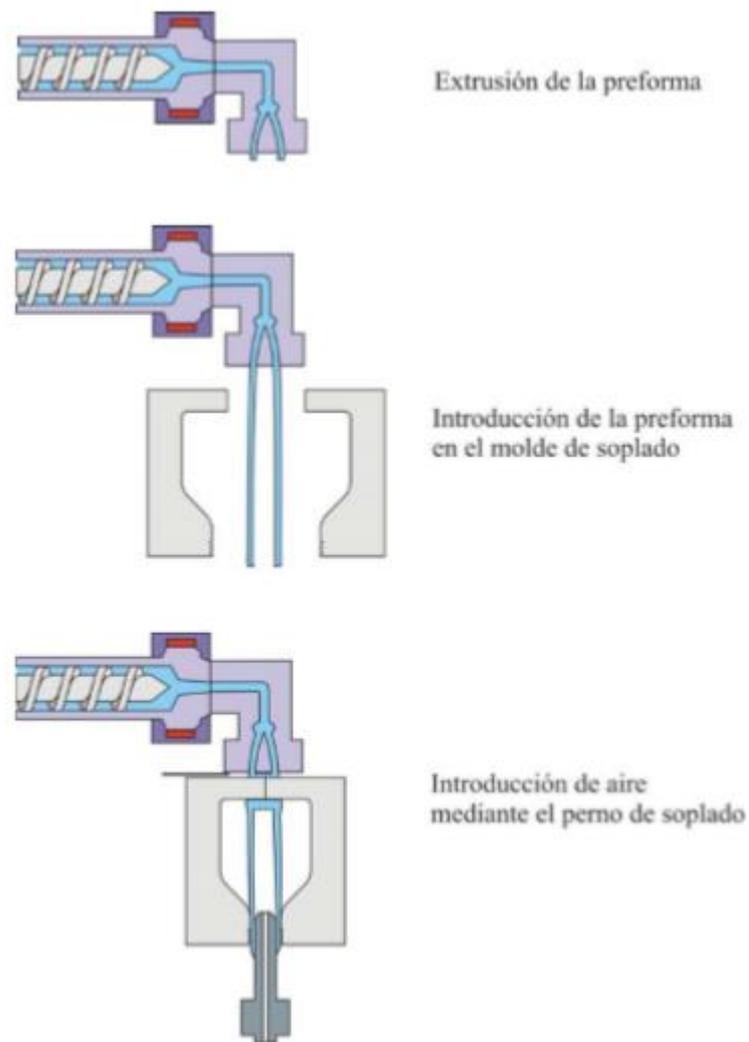


Figura 3. Proceso de Extrusión y Soplado.
Tomado de (Beltrán y Marcilla, 2012).

2.2.4. Moldeo por Inyección y Soplado

Es un proceso que consta de una unidad de inyección y de la unidad de soplado, la unidad de inyección radica en un tornillo giratorio que actúa como un pistón, de manera que el tornillo gira y produce la plastificación del material mediante el calor, el material fundido fluye por las cavidades del molde mediante la boquilla de inyección. La resina fundida es inyectada a un molde cerrado a altas presiones donde se enfría y adquiere la forma (Acosta Prado y Prada Ospina, 2017).

El método más aplicado en la industria del plástico está conformado por una mesa de tipo rotatoria compuesta por una barra central, la primera estación con molde de tipo negativo y positivo se cierran sobre la preforma, el molde de inyección se abre y la preforma se desplaza encima de la barra central, hasta llegar a la siguiente estación que se compone del molde de soplado que se cierra alrededor de la preforma soplada, mediante la abertura de la barra central se enfría y se retira del molde.

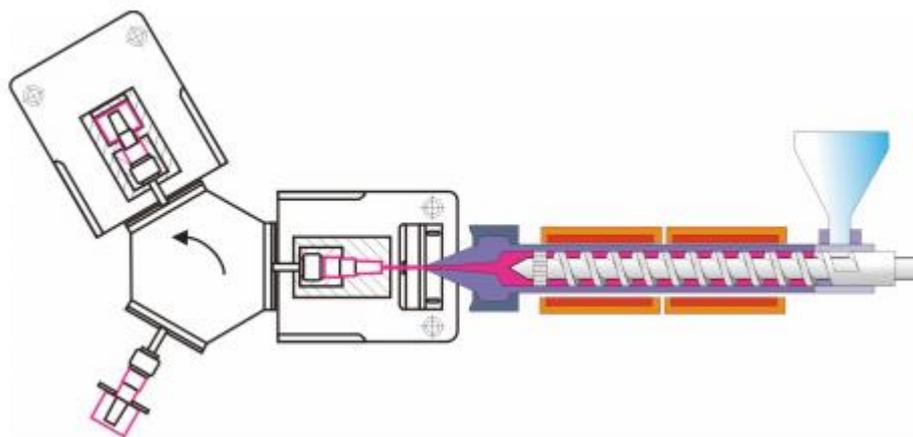


Figura 3. Moldeo por Inyección y Soplado.

Tomado de (Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012).

2.2.5. Moldeo por Inyección Estirado y Soplado

El proceso de inyección por estirado y soplado para la producción de botellas PET, especialmente para bebidas carbonatadas con altos volúmenes de CO_2 que soportan presiones hasta 5 atmósferas, para este proceso se obtiene la preforma mediante la unidad de inyección (Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012). El proceso de Inyección estirado y soplado se compone de 2 etapas, la preforma obtenida mediante inyección es almacenada. Se calienta hasta alcanzar una temperatura mayor a la de su transición vítrea de $75^{\circ}C$ (Bordival, Schmidt, Maoult, y Velay, 2009), para posteriormente estirar la preforma por una varilla de forma cilíndrica y por ultimo pasar al soplado con aire a presiones entre 200-450

psi (Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012), finalmente la preforma toma la forma del molde, se enfría para el posterior desmoldeo.

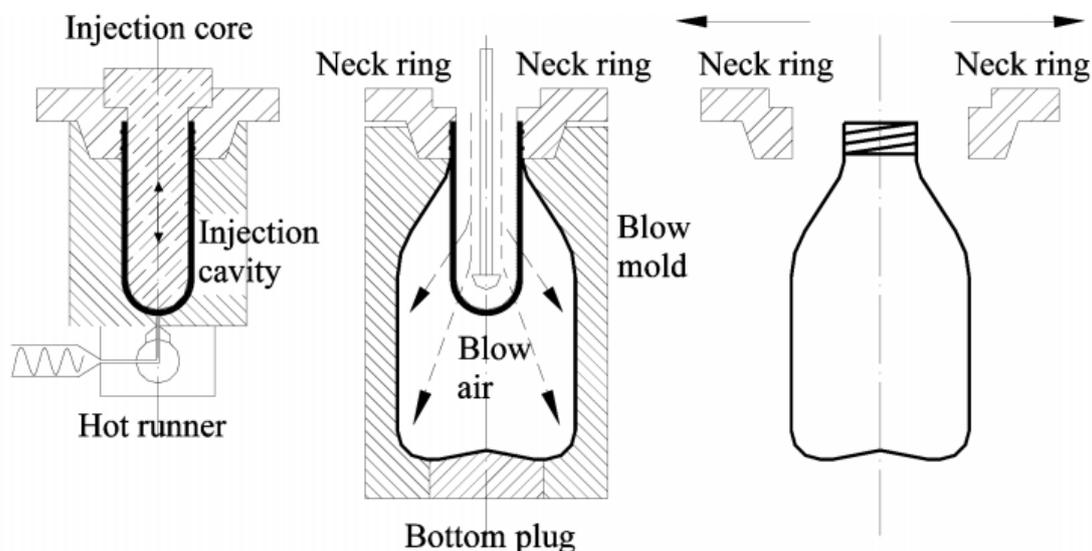


Figura 4. Proceso de Inyección Estirado y Soplado.

Tomado de (Pham, Thibault, y Lim, 2004).

2.3. Reciclaje de envases PET

Los envases de tereftalato de polietileno están compuestos de material 100% reciclable que pueden ser recuperados para obtener nuevos productos, representado así una fuente importante de ahorro de recursos y energía reduciendo la cantidad de residuos que se acumulan. El reciclaje se divide en las siguientes etapas: recuperación de los residuos, almacenamiento, transporte y procesamiento final (Durán Flores, 2012).

La recuperación de los residuos se lleva a cabo mediante los recicladores de base que son el primer eslabón de la cadena del reciclaje, encargados de la recolección de materiales aprovechables de los residuos para generación de materias primas de bajo costo (Favela Ávila et al., 2013). El material recuperado se traslada hacia los centros de acopio donde se realiza la compactación del material reduciendo el volumen, facilitando de esta forma el transporte hacia los

centros de procesamiento final que clasifican los envases de acuerdo con el tipo de plástico, para los envases PET se debe separar las etiquetas de PVC y tapas de polietileno de forma manual, siguiendo con el proceso de molienda para obtener escamas de PET. Las escamas de PET se lavan después del proceso de molienda, el proceso de lavado consiste de dos pasos, primeramente se realiza un lavado caliente con solución de hidróxido de sodio al 2% y detergente a 80°C, terminando con un lavado frío con agua (Awaja y Pavel, 2005).

Continuando el proceso, el secado es un paso importante para el procesamiento de escamas PET reduciendo el contenido de humedad, evitando de esta manera la degradación hidrolítica que produce la disminución de la viscosidad del material. Las condiciones óptimas de secado son de 140 a 170°C entre 3 a 7 horas. Terminado todo este proceso pasa a la máquina extrusora que convierte las escamas de PET en pellets (Awaja y Pavel, 2005).

2.4. Marco Normativo de Residuos Sólidos

La Constitución de la República del Ecuador, en el Artículo 265, establece la competencia de los gobiernos autónomos descentralizados para la prestación de servicios públicos de manejo de desechos sólidos, de igual manera esta información se encuentra corroborada por el Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralización, en el Artículo 137 sobre la prestación de servicios públicos para el manejo de desechos sólidos, en todas sus fases, su manejo está sujeto bajo el establecimiento de normativas locales en el área de su jurisdicción.

Por otra parte, en el Código Orgánico del Ambiente, el Artículo 27, menciona entre las facultades de los GAD municipales en materia ambiental, en el marco de sus competencias, el ejercicio de las facultades de "...Generar normas y procedimientos para la gestión integral de los residuos y desechos para prevenirlos, aprovecharlos o eliminarlos, según corresponda...". Además, los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, están obligados a "...

fomentar en los generadores alternativas de gestión para el desarrollo de tecnologías. Estos deberán establecer procedimientos para barrido, recolección y transporte, almacenamiento temporal de ser el caso, acopio y/o transferencia...”, según menciona el Artículo 231.

Ecuador, mediante el Ministerio de Ambiente, crea el programa nacional para la gestión integral de desechos sólidos (PNGIDS), para mejorar la gestión de residuos sólidos de los gobiernos autónomos descentralizados, que hasta ese momento carecía de criterios técnicos, perjudicando y contaminando los recursos, con el propósito de disminuir la contaminación mediante estrategias y capacitaciones (Ministerio del Ambiente, s. f.).

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), mediante reforma del Libro VI, por el Acuerdo Ministerial 061, Capítulo VI, Gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, y desechos peligrosos y/o especiales, establece, en el Artículo 73, que es obligatorio tanto para empresas privadas y gobiernos municipales el impulsar programas de aprovechamiento de materiales para reincorporar al ciclo productivo de forma eficiente mediante el reciclaje para reducir la cantidad de residuos sólidos, considerando lo siguiente: “...Los procesos de aprovechamiento deben promover la competitividad mediante mejores prácticas, nuevas alternativas de negocios y generación de empleos”, Además, en el Artículo 74, del tratamiento, las empresas privadas y/o municipalidades “...Para el tratamiento de residuos y/o desechos sólidos no peligrosos se pueden considerar procesos como: mecánicos, térmicos para recuperación de energía [...] que avale la autoridad ambiental” (Texto Unificado De Legislación Secundaria de Medio Ambiente, 2015)”.

2.4.1. Marco Normativo de gestión integral de plásticos en Ecuador

De acuerdo con las políticas para gestión integral de plásticos en el Ecuador, Acuerdo Ministerial 19, Título II, de la producción de productos plásticos, en el Artículo 8, resuelve: “Todo el sector industrial y productivo de materiales

plásticos, debe realizar el análisis de ciclo de vida de sus productos, evaluando los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados, y estableciendo posteriormente metas para la mejora continua, a través de...” un inventario de uso de recursos, energía y de generación de emisiones en cada una de las entradas y salidas relevantes del sistema. En el Artículo 18, establece que, “ Los rellenos sanitarios o vertederos controlados, no deben sobrecargarse de productos plásticos que puedan tratarse o reciclarse, [...] y a nivel industrial un control del ciclo de vida de productos plásticos y reducir su impacto ambiental negativo”

2.4.2. Normativa para uso de PET reciclado en la fabricación de botellas plásticas.

En el año 2017 se emitió el Acuerdo Ministerial 120, por el cual se estipula la política nacional para el uso de resina PET reciclada producida en el Ecuador para la fabricación de botellas plásticas utilizadas en bebidas. En el Artículo 2, establece el ámbito de aplicación del Acuerdo insta que :“El presente Acuerdo Interministerial será de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional para toda persona natural, jurídica, pública, privada, mixta, nacional o extranjera que participe en el acopio, acondicionamiento y/o transformación del residuo de botellas de plástico no retornables de PET a resina reciclada de PET (R-PET) grado alimenticio [...] para la fabricación de bebidas en botellas de PET no retornables” por otra parte, en el Artículo 6, menciona que la “Fabricación de botellas y/o preformas con R-PET grado alimenticio para bebidas. - Los fabricantes de preformas y/o botellas plásticas no retornables de PET para bebidas, deberán incorporar un 25% de material R-PET grado alimenticio de origen ecuatoriano [...] y deberá tener el certificado expedido por la Agencia de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria [...] el Acuerdo es aplicable para las fábricas de preformas y/o botellas plásticas retornables de PET en cuya producción anual se utilice 2.500 toneladas de materia prima de PET y R-PET”

2.5. Cadena productiva de envases PET en Ecuador

En Ecuador el sector que se dedica a la actividad de transformación de resinas en productos finales va en aumento, de acuerdo a la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS) en el Ecuador existen alrededor de 600 empresas que están relacionadas a la industria del plástico con procesos como extrusión, inyección, soplado. Las botellas de PET que se producen a partir de la polimerización entre el ácido tereftálico y el etilenglicol, reemplazando a las botellas de vidrio, están compuestas por 64% petróleo, 23% gas natural y 13% de aire (Laura y Ruiz, 2009). El PET utilizado de forma masiva para la industria de bebidas carbonatadas, como Arca Continental en Ecuador, produce alrededor de 48 mil botellas por hora (Arca Continental, s. f.) pero para la producción de botellas es necesario la resina PET grado botella; ante el nulo desarrollo de la industria petroquímica en Ecuador, que demanda dependencia de materias primas para la producción de envases, por lo tanto, se ha generado un aumento de importaciones en el país. Según el Banco Central del Ecuador (2019), las importaciones de resina para elaboración de envases PET provienen principalmente de Perú, Estados Unidos, México y Colombia. En el año 2019 Ecuador importó 1892.7 toneladas métricas de resina PET de acuerdo con la figura 5 (Banco Central del Ecuador, 2009).

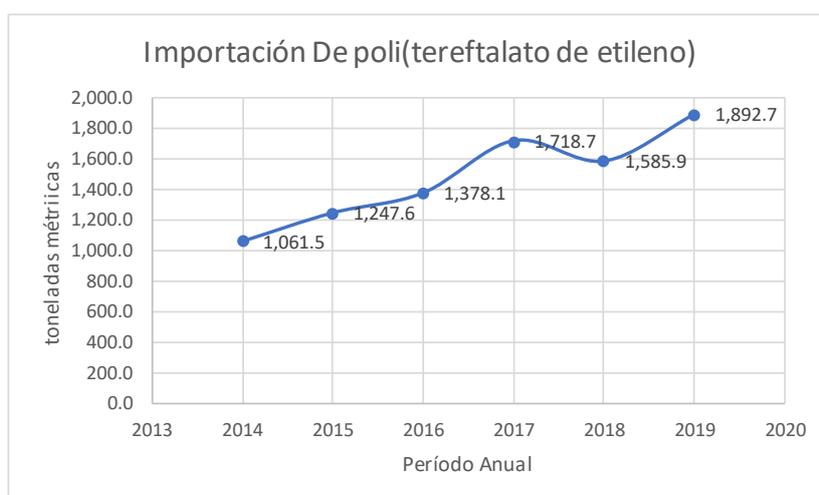


Figura 5. Importación tereftalato de polietileno en Ecuador.

Adaptado de (Banco Central del Ecuador, 2009).

La Industria que produce la mayor cantidad de envases PET en el país es la relacionada a la fabricación de bebidas carbonatadas, entre las que se puede mencionar Arca Continental considerada como la segunda embotelladora más grande de América Latina, que se encarga de la producción, distribución y venta de bebidas no alcohólicas de la marca The Coca Cola Company, en el año 2010 Arca Continental compra el 75% de las acciones de Ecuador Bottling Company (El Universo, 2010), convirtiéndose así, en la embotelladora más grande del Ecuador que hasta ese año se encargaba de la producción distribución y comercialización de bebidas no alcohólicas en el país y pasa a formar parte de Arca Continental Ecuador, esta industria cuenta con 3 plantas para fabricación de bebidas ubicadas en Guayaquil, Quito y Santo Domingo (Arca Continental, 2016), misma que dispone con un sistema de soplado en línea para la fabricación de envases PET, que conforman sopladoras rotativas de la marca SIPA modelo SFR 16 que operan tanto en las plantas de Guayaquil, Quito y Santo Domingo (SIPA, 2016) Arca Continental, alineándose a sus objetivos de sustentabilidad y políticas ambientales ha establecido el uso de materiales reciclados incorporándolos a sus envases de tipo PET, mediante el reciclaje con el apoyo de organizaciones para el acopio y proceso de obtención de resina PET reciclada, en Ecuador Arca Continental decide realizar una alianza estratégica con Intercia S.A. para el procesamiento de material reciclado para la fabricación de botellas PET (El telégrafo, 2014). El centro integral de Intercia se ubica en la provincia del Guayas y maneja alrededor de 14000 toneladas de botellas que corresponde alrededor del 37% de la producción en el país (Suárez, 2017), lo que implica la reducción del uso de materias primas y disminución de consumo de energía. El reciclaje de envases PET pasa por procesos de transformación que involucra las etapas de recolección, acopio, clasificación, molido, lavado y procesamiento de hojuelas en pellets para la producción de una nueva botella que utiliza Arca Continental (Starlinger, s. f.).

La Industria Intercia ante la alianza estratégica con Arca Continental, implementa un sistema de última tecnología para la producción de pellets que es utilizada en la elaboración de botellas para Coca Cola, las botellas de Arca Continental tienen

implementado 25% del material reciclado producido por Intercia S.A. (El telégrafo, 2014). La tecnología implementada es de origen Austriaco de la marca Starlinger.

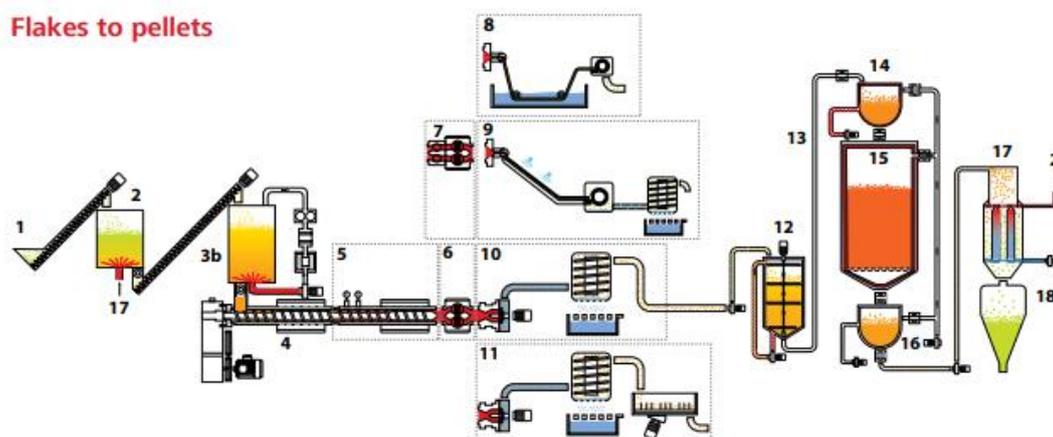


Figura 6. Proceso implementado por Intercia S.A.

Tomado de (Starlinger, s. f.).

El proceso de Intercia consta de la recolección de envases PET post consumo mediante los recicladores de base, posteriormente los materiales reciclados llegan a los centros de acopio autorizados (IRR, 2015) para seguir con la compactación y transporte hacia el centro integral de reciclaje de Intercia, en la planta los envases PET pasan por un proceso de selección, clasificación automática y manual que permite separar el plástico por colores y calidad, para al proceso de molienda para obtener hojuelas de PET, posteriormente pasan al proceso de lavado en caliente con hidróxido de sodio con el fin de eliminar restos de etiquetas y pegamentos (Suárez, 2017). La siguiente etapa de secado para evitar que las cadenas poliméricas se hidrolicen y disminuya la viscosidad del material (Lepoittevin y Roger, 2011) se la realiza con aire caliente y termina todo el proceso en la etapa de extrusión para obtener pellets de resina grado alimenticio que finalmente utiliza Arca Continental como materia prima para la fabricación de botellas (Arca Continental, 2016), a continuación se presenta el diagrama de flujo de la producción de envases PET en Ecuador.

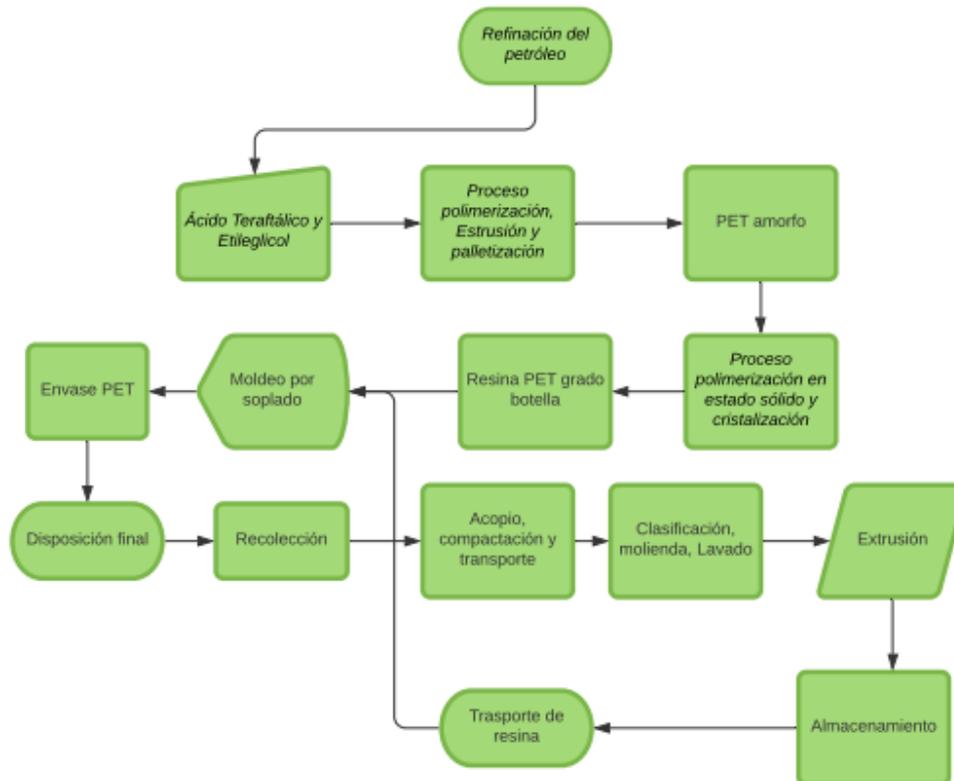


Figura 7. Diagrama de Flujo de la producción de envases PET.

3. METODOLOGÍA

En el presente trabajo de investigación, para cumplir con los objetivos propuestos, se partió de una investigación de tipo bibliográfica sobre la cadena de producción de envases PET en el Ecuador a partir de resina virgen, analizando su ciclo de vida desde la cuna a la puerta de fábrica, utilizando como herramienta el software OpenLCA, para el inventario de ciclo de vida se emplearon datos de referencia secundaria e inventarios de la base de datos Ecoinvent 3.6, adicionalmente se emplearon datos a nivel nacional recopilados de fuentes como el Banco central del Ecuador sobre importación de resina PET

3.1. Ciclo productivo de los envases PET en Ecuador.

Para determinar el ciclo productivo de los envases PET en Ecuador se realizaron consultas en medios electrónicos, publicaciones, noticias de periódicos, revistas y referencias nacionales; se requirió una búsqueda bibliográfica acerca de la

nomenclatura de designación y codificación de mercancías del Ecuador para obtener la subpartida NANDINA de la materia prima empleada para la fabricación de botellas de tereftalato de polietileno con partida 392062000 (Ministerio de Comercio Exterior, 2017) y de esta manera obtener la información de las toneladas métricas importadas hacia Ecuador, la consulta se la realizó en la fuente de datos del Banco Central del Ecuador sobre comercio exterior (Banco Central del Ecuador, 2009).

Mediante revisiones bibliográficas se estableció que la Industria que más envases PET produce en el país es la relacionada a la producción de bebidas no alcohólicas carbonatadas, la industria dedicada a la fabricación de bebidas representa el 57% de la huella ecológica en el Ecuador (CEPAL, 2013).

3.2. Unidad Funcional

La unidad funcional escogida para este estudio fue 12.58 kg de resina PET que produce 12.2 kg de botellas equivalente a 1000 botellas PET (Gironi y Piemonte, 2011).

3.3. Límites del sistema

El estudio constituyó un análisis del ciclo de vida de la cuna a la puerta de fábrica, lo que significa que se consideraron los procesos y se establecieron de acuerdo con la norma ISO 14040:2006; se realizó el análisis de la producción de material PET, que incluye la extracción de recursos naturales como petróleo crudo y gas natural, para el proceso de producción de la resina y métodos de transformación (Gere y Czigany, 2020).

Para establecer los límites del sistema en el estudio se contempló principalmente la producción de envases PET relacionados al modelo establecido en Ecuador, teniendo en cuenta desde los procesos de producción de resina PET y transformación. Los datos de entrada se tomaron de referencias bibliográficas de la base de datos de Ecoinvent (CPME, 2017). El proceso incluye la extracción

de materia prima para la producción de resina y fabricación de botellas para bebida con sustitución de material reciclado. La evaluación del ciclo de vida incluyó los impactos generados por estos procesos. Los procesos que se excluyen de este estudio y se encuentran fuera de los límites del sistema son la fabricación de bebidas líquidas, proceso de embotellado, distribución de bebidas, uso y disposición final, los procesos relacionado con la producción de etiquetas como película plástica y tapas de polipropileno.

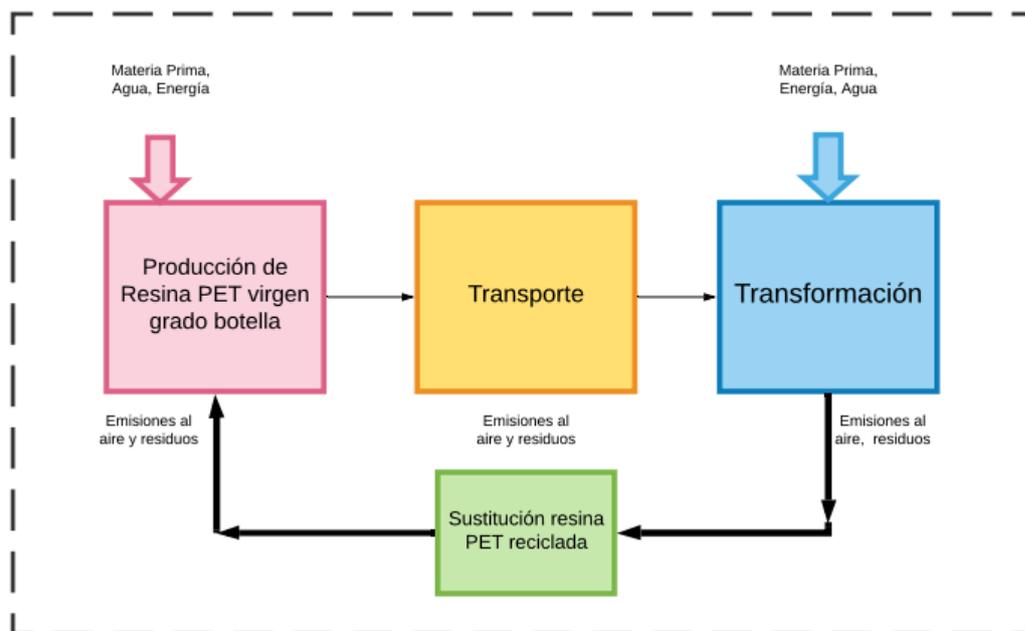


Figura 7. Límites del sistema

Adaptado de (Changwichan y Gheewala, 2020).

3.4. Escenarios para evaluar

Para el presente estudio se definieron 4 escenarios a modelar con el objetivo de evaluar la emisión de gases y gasto energético, y el posterior ahorro en esquemas de reciclaje de los envases PET en Ecuador, es decir, los escenarios planteados correspondieron a la producción de envase con resina PET 100% virgen y escenarios con material reciclado, para cada escenario se utilizó la unidad funcional anteriormente establecida, a continuación, se presenta los escenarios definidos para el estudio.

3.4.1. Escenario1: Botella 100 % materia virgen.

En este escenario se contempló desde la extracción de materias primas, obtención de resina PET grado botella, transformación mediante el proceso de moldeo por soplado que lleva a cabo Ecuador Bottling Company (Arca Continental, s. f.) y todos los procesos de transporte relacionados.

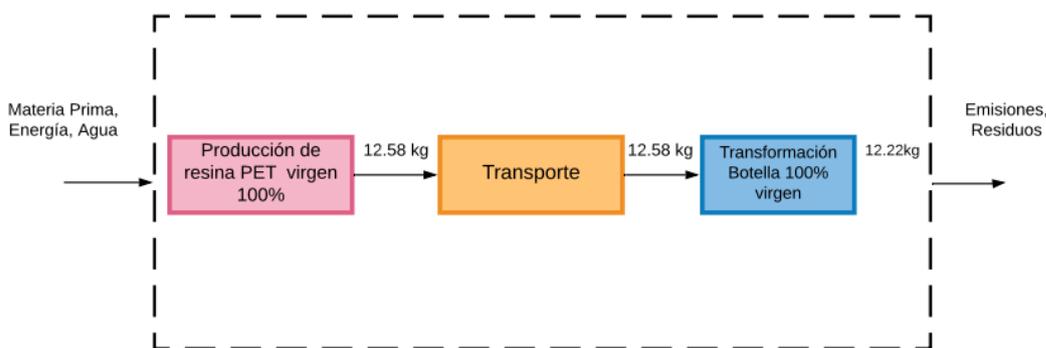


Figura 8. Diagrama de flujo escenario botella 100% materia virgen.

3.4.2. Escenario 2: Botella 25% reciclada

En el escenario de reciclaje 25% se tomó en cuenta la normativa emitida para los fabricantes de botellas PET grado alimenticio para bebidas donde está estipulado el uso de 25% resina PET reciclada y 75% resina virgen, en este escenario se tomó en cuenta procesos desde la extracción de materia prima producción de resina PET y transformación, para la producción de resina PET reciclada se tomó en cuenta todos los procesos relacionados con esta actividad desde el transporte, clasificación, lavado, y molienda; para el proceso de transformación de escamas a pellets se aplicaron los procesos implementados por Intercia S.A. (Arca Continental, 2019).

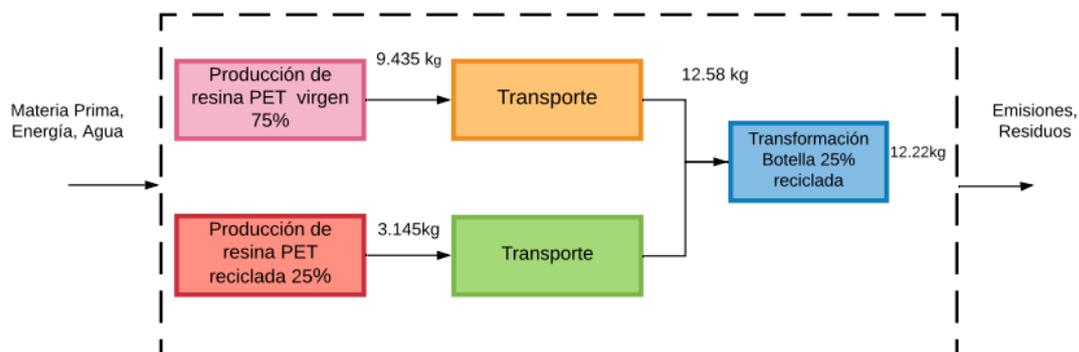


Figura 9. Diagrama de flujo escenario botella 25% reciclada.

3.4.3. Escenario 3: Botella 50% reciclada

El escenario de 50% resina reciclada y 50% resina virgen contempló desde la extracción de materia prima procesos de transformación mediante moldeo soplado para la sustitución de resina virgen por resina reciclada, se tomó en cuenta los procesos de clasificación, lavado, molienda, transformación y todos los procesos de transporte relacionados en este escenario.

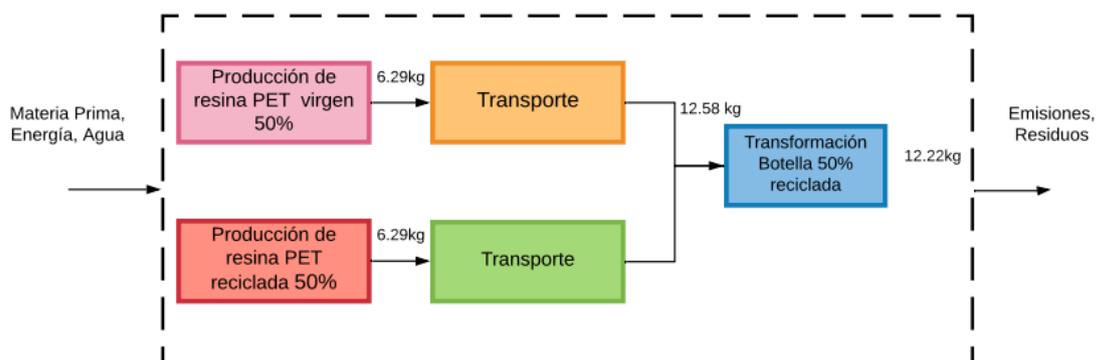


Figura 10. Diagrama de flujo escenario botella 50% reciclada.

3.4.4. Escenario 4: Botella 100% reciclada

El escenario constó con la obtención de botellas con material PET 100% reciclado, contempló los procesos para la obtención del material reciclado y su transformación mediante moldeo por soplado y todos los procesos de transporte relacionados.

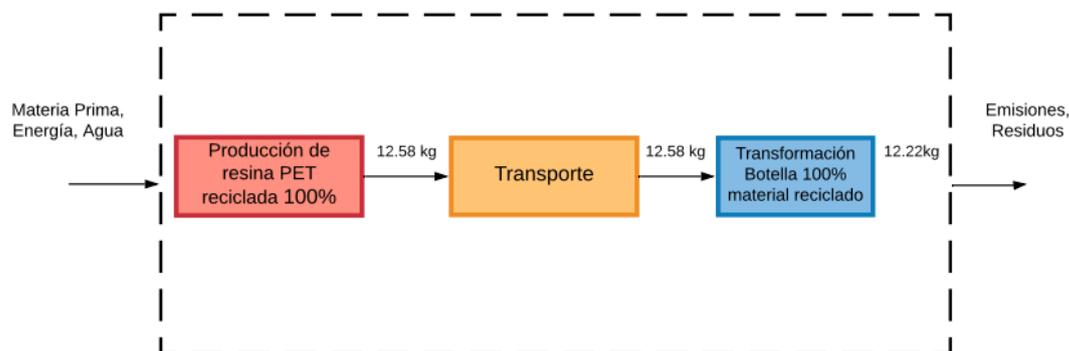


Figura 11. Diagrama de flujo escenario botella 100% reciclada.

3.5. Transporte

El transporte de materias primas que se tomó en cuenta corresponde desde la importación de resina de Tereftalato de polietileno, que se basa en datos recopilados del Banco Central del Ecuador; se determinó como año base el 2019, año en el que se importaron 1832.7 toneladas métricas de resina, se toma como referencia de país de origen el Perú al ser el país que más exporto resina ese mismo año hacia Ecuador, para determinar la ruta de importación de Perú a Ecuador se tomó como referencia los datos expresados por el Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones, perfil logístico de Perú (PRO ECUADOR, 2018), donde se menciona la ruta del puerto de Callao - Perú hacia el puerto de Guayaquil, además se tomó en cuenta la distancia mencionada desde Lima al puerto de Callao vía terrestre y del Puerto de Guayaquil hacia la planta de producción de botellas, con esta información el transporte se expresa en kg por km recorrido. Para valorar el transporte de los envases PET desde los centros de clasificación hacia la planta de tratamiento de residuos considerada en este estudio, se tomó en cuenta las toneladas de peso bruto vehicular de 7.5 y 16 toneladas (Papong et al., 2014).

T1: distancia de Lima al puerto de Callao

T2: distancia del puerto de Callao al puerto de Guayaquil.

T3: distancia del puerto de Guayaquil a la planta de transformación.

T4: distancia del centro de clasificación hacia la planta integral de reciclaje.

T5: distancia de la planta integral de reciclaje hacia la planta de transformación.

Para obtener la distancia del puerto de Guayaquil hacia la planta de transformación y del centro integral de reciclaje hacia la planta de soplado de botellas se utilizó la aplicación Google Earth.

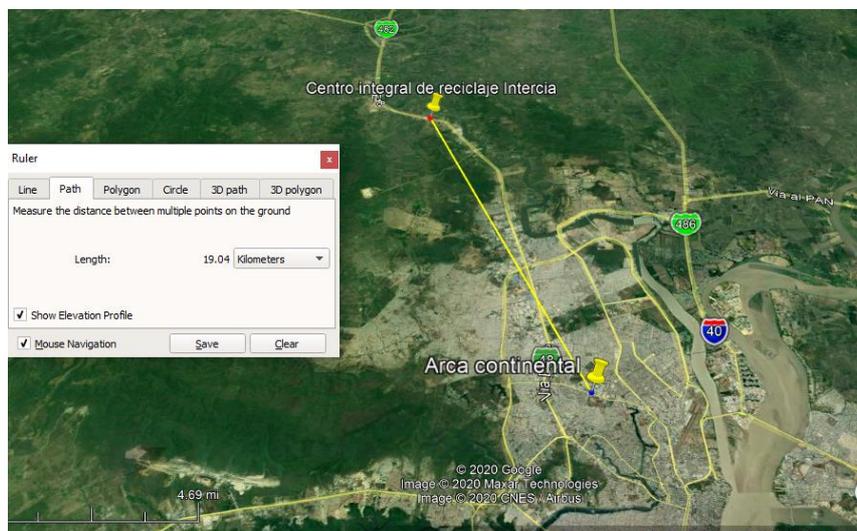


Figura 12. Transporte del centro Integral de reciclaje hacia la planta de transformación.

Tomado de (Google Earth, 2020).

Igualmente, la distancia del centro de Acopio hacia el centro Integral de reciclaje fue calculada mediante Google Earth

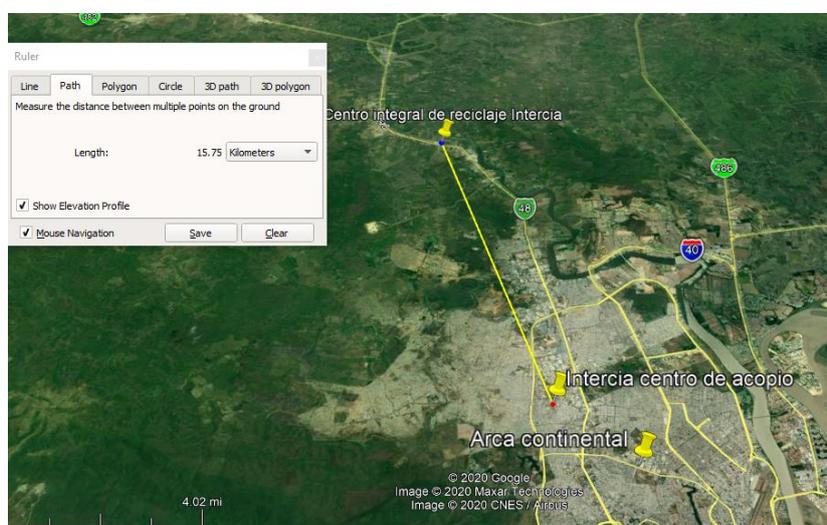


Figura 13. Distancia del centro de clasificación hacia el centro integral de reciclaje.

Tomado de (Google Earth, 2020).

A continuación, en la tabla 2, se presenta los valores de transporte planteados.

Tabla 2

Transportes contemplados para el estudio

Transporte	Kilómetros (km)	Toneladas de peso bruto vehicular (ton)
T1	15	7.5
T2	1400	Container ship
T3	14.66	16
T4	15.75	7.5
T5	19.04	16

3.6. Inventario del Ciclo de Vida de las botellas PET

Para el inventario del ciclo de vida se identificaron los procesos clave de producción y transformación de botellas aplicados en Ecuador, para la posterior identificación de los inventarios de ciclo de vida y para la recopilación de información mediante consulta bibliográfica se determinaron las etapas del ciclo de vida de los envases PET en el país, la consulta bibliográfica consistió en una verificación en medios electrónicos, publicaciones, referencias nacionales y normativas para el uso de PET reciclado en botellas en contacto con alimentos, se verificó que en Ecuador la industria que más produce envases PET en el país son las relacionadas a las bebidas no alcohólicas (El Telégrafo, 2014)

Para el requisito indispensable sobre la calidad de datos necesario para el estudio se consideró la base de datos de Ecoinvent data base 3.0, referente a los procesos de producción que contiene los materiales indispensables para la producción de resina de PET grado botella (Fröhlich, Ruiz, Valsasina, y Johnson, 2017), resina reciclada y proceso de soplado para la transformación en botellas, los inventarios utilizados se adaptaron a la unidad funcional del estudio. Las entradas y salidas como la energía y materias primas en los procesos de producción y transformación se muestran a continuación.

3.6.1. Producción de resina PET grado botella virgen.

Para la producción de resina PET se consideró el proceso de esterificación entre etilenglicol y ácido tereftálico, para este proceso se consideró el transporte entre el puerto de Callao en el Perú y el puerto de Guayaquil en Ecuador, la electricidad para este proceso se adaptó al modelo de Ecuador (market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – EC), a continuación, se presenta al detalle el proceso mencionado en la tabla 3.

Tabla 3

Entradas Producción de Resina PET Adaptado a la Unidad Funcional

Entradas	Cantidad	Unidad
Antimonio	0.00339	kg
Dietilenglicol	0.05182	kg
Electricidad	2.49	kWh
Etilenglicol	4.21	kg
Gas natural	0.76	m ³
Nitrógeno líquido	0.27	kg
Ácido Fosfórico	0.00035	kg
Ácido Tereftálico	10.85	kg
Salidas		
Resina tereftalato de polietileno grado botella	12.58	kg
CO ₂	1.42	kg
Óxidos de nitrógeno	0.00112	kg

Adaptado de (Fröhlich et al., 2017).

El resultado del proceso termina con el granulado de polímero saliendo de la fábrica para el proceso de transformación de pellets a botellas.

3.6.2. Producción de resina PET reciclada grado botella.

El Inventario del ciclo de vida del proceso de resina a partir de envases PET reciclados se lo realizó en base a los datos proporcionados por Ecoinvent, el proceso comenzó con la recepción de pacas de desechos PET clasificados y todos los procesos relacionados a la producción de pellets reciclados, la

eficiencia de producción de resina de PET a partir de residuos reciclados es del 90% (Gironi y Piemonte, 2011), el transporte contemplado en la producción de resina reciclada es del centro de clasificación al centro integral de reciclaje.

Tabla 4

Entradas y salidas del proceso de producción de resina PET reciclado adaptado a la unidad funcional

Entradas	Cantidad	Unidad
Electricidad	5.62	kWh
Detergente	0.00113	kg
Hidróxido de sodio	0.38	kg
Ácido Sulfúrico	0.226	kg
Agua	0.08013	m ³
Gas natural	26.16	MJ
Botellas recicladas, clasificadas	13.98	kg
Desechos sólidos Municipales	4.40300	kg
Desechos sólidos Municipales	8.17700	kg
Salidas		
Tereftalato de polietileno grado botella reciclada	12.58	kg

Adaptado de (Kägi, Muñoz, y Ruiz, 2014).

Para las entradas del proceso de producción de PET reciclado, se utilizaron datos acerca de la disposición final de desechos sólidos en Ecuador, donde el 65% de municipios realiza la disposición en botaderos y el 35% en rellenos sanitarios (Ministerio del Ambiente- PNGIDS, 2013), estos datos fueron adaptados de acuerdo con la unidad funcional del estudio.

En Ecuador la industria que realiza mayor número de envases PET es la relacionada con el proceso de producción y embotellado de bebidas no alcohólicas, que realizan el proceso por soplado (SIPA, 2016), para el proceso determinado como transformación se indica a continuación las entradas en la tabla 5.

Tabla 5

Entradas transformación de resina PET adaptado a la unidad funcional.

Entradas	Cantidad	Unidad
Electricidad	21.38	kWh
Agua	0.036	m ³
Resina de polietileno de tereftalato	12.58	kg
Salida		
Botellas	12.22	kg

Adaptado de (Hischier y Classen, 1997).

La salida del proceso de transformación es 12.2 kg equivalente a 1000 botellas PET (Gironi y Piemonte, 2011).

3.7. Evaluación del Inventario del ciclo de vida

La última fase del ciclo de vida es la evaluación del inventario para este proceso se utilizó el software OpenLCA, el método de impacto considerado para el estudio fue Recipe Midpoint indicadores de punto medio (Chen, Pelton, y Smith, 2016) se seleccionó la categoría de impacto referente a cambio climático que cuantifica los gases de efecto invernadero expresado en emisiones de CO_2eq (Huijbregts, Steinmann, Elshout, Stam, y Zelm, 2017) de cada escenario propuesto, los resultados se obtuvieron analizando para los 1000 envases de PET.

Para determinar el gasto energético en los escenarios planteados, se escogió el método de impacto de demanda energética acumulada con el propósito de obtener el uso de energía en cada uno escenario en estudio, tanto para la etapa de obtención de resina y transformación en botellas, las categorías de impacto consideradas para el método de la demanda energética acumulada se presentan en la tabla 6 (Hischier et al., 2010).

Tabla 6

Categorías de impacto para la demanda energética acumulada.

Categorías de impacto	Unidad	
Recursos Energéticos no renovables	Recursos energéticos no renovables fósiles	MJ
	Recursos energéticos no renovables nuclear	MJ
	Recursos no renovables bosque primario	MJ
Recursos Energéticos renovables	Recursos renovables solar	MJ
	Recursos renovables viento	MJ
	Recursos renovables biomasa	MJ
	Recursos renovables agua	MJ
	Recursos renovables geotérmicos	MJ

Adaptado de (Hischier et al., 2010).

4. RESULTADOS

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos del estudio, mediante tablas y gráficos se presentan las categorías de impacto evaluadas para cada una de las etapas contempladas en cada escenario propuesto.

El ciclo productivo de las botellas PET comienza desde la extracción de la materia prima, el petróleo y el gas natural los envases se producen a partir de etilenglicol y ácido teraftálico purificado obteniendo la resina, el Ecuador no cuenta con industria petroquímica por tal razón en el país se realiza tanto la importación de resina de tereftalato de polietileno y preformas que mediante procesos de transformación como soplado obteniendo así, un envase para bebidas.

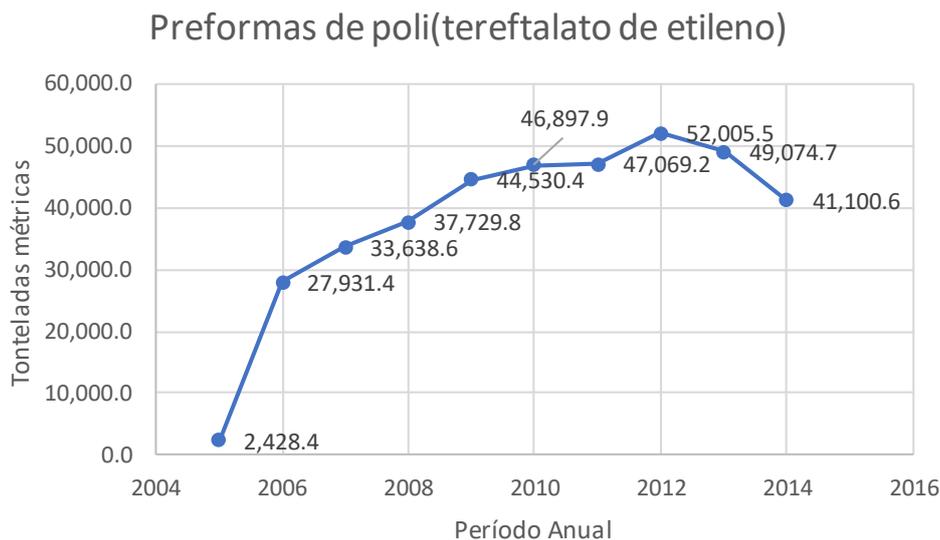


Figura 14. Importación de preformas tereftalato de polietileno en Ecuador. Tomado de (Banco Central del Ecuador, 2020).

En Ecuador la mayor parte de la industria plástica importa las preformas de PET, de acuerdo con el Banco central del Ecuador (2009), el año de mayor importación de este material fue en el 2012, pero para este estudio se consideró desde la producción de resina para estudiar todo el ciclo de vida del producto de los envases PET.

4.1. Escenario 1: Botella 100% materia virgen

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en OpenLCA mediante el método de punto medio Recipe, para el escenario 1 se obtuvieron las siguientes emisiones respecto a kg de $CO_2 eq$ en la categoría de cambio climático.

Tabla 7

Emisiones de kg de $CO_2 eq$ en el escenario 1.

Escenario 1		
	Cantidad	Unidad
Producción resina 100% virgen	30.8	kg de $CO_2 eq$ /1000 botellas
Transformación botellas 100% virgen	38.3	kg de $CO_2 eq$ /1000 botellas
Total, kg de $CO_2 eq$	69.2	kg de $CO_2 eq$ /1000 botellas

CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 1

■ Producción resina 1000% virgen ■ Transformación botellas 100% virgen

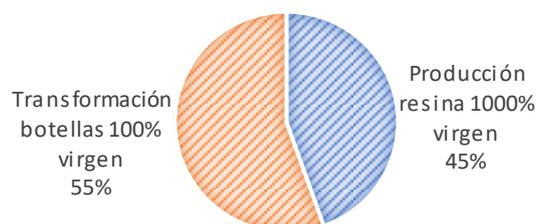


Figura 15. Cambio climático escenario 1.

Como se puede observar, para el escenario 1 se obtuvo 69.2 kg de CO_2_{eq} para las 1000 botellas producidas. Para la producción de resina 100% virgen con 30.8 kg de CO_2_{eq} con un 45%. el proceso de obtener ácido tereftálico a partir de xileno fue el proceso de inventario de mayor contribución a la categoría de impacto de cambio climático reportado, esto se puede apreciar en el diagrama de Sankey en el (Anexo 1).

Tabla 8

Demanda energética acumulada para el escenario 1.

Escenario 1			
Categorías de Impacto	Producción de resina	Transformación	Total
Recursos energéticos no renovables fósiles	869.0	974.7	1843.7
Recursos energéticos no renovables nuclear	36.3	39.4	75.7
Recursos no renovables bosque primario	0.0	0.0	0.0
Recursos renovables biomasa	6.0	86.4	92.4
Recursos renovables geotérmicos	0.3	0.3	0.6
Recursos renovables solar	0.1	0.1	0.2
Recursos renovables agua	17.1	80.1	97.2
Recursos renovables viento	2.1	2.8	4.9
Total, gasto energético	2114.5MJ/1000 botellas		

Mediante el método de impacto demanda energética acumulada, se determinó el gasto energético para el escenario 1 con un valor de 2114.5 MJ/1000botellas. En este caso el resultado más alto se encuentra en la categoría de recursos energéticos no renovables fósiles para la producción de botellas de materia prima 100% virgen por el uso de energía no renovable fósil tanto para la etapa de producción como de transformación.

4.2. Escenario 2: Botella 25% reciclada.

El escenario 2 contempla la adición de 25 % de materia prima reciclada, se obtienen los resultados para la categoría de cambio climático presentados en la tabla 9.

Tabla 9

Emisiones de kg de CO₂ eq en el escenario 2.

Escenario 2		
	Cantidad	Unidad
Producción resina 25% reciclada	2.96	kg de CO ₂ eq/ 1000 botellas
Producción resina 75% virgen	23.15	kg de CO ₂ eq/1000 botellas
Transformación botellas 25% recicladas	33.43	kg de CO ₂ eq/1000 botellas
Total, kg de CO₂ eq	59.5	kg de CO₂ eq/1000 botellas

CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 2

- Producción resina 25% reciclada
- Producción resina 75% virgen
- Transformación botellas 25% reciclada

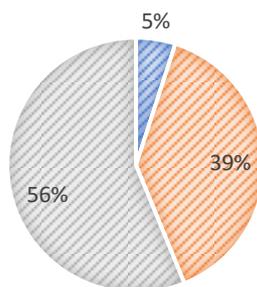


Figura 16. Cambio climático escenario 2.

En el escenario 2 se obtiene un total de 59.5 kg de CO_{2eq} para las 1000 botellas producidas, suma de los procesos de producción de resina 25% reciclada 75% virgen y el proceso de transformación a botellas, para la producción de resina reciclada 25% se obtuvo como resultado 2.96 kg de CO_{2eq} con una contribución del 5%, comparativamente menor al resultado para la producción de resina 75% materia virgen que contribuyo con el 39% para la emisión de gases.

Para el caso de la demanda energética acumulada, a continuación, se presentan los resultados obtenidos, expresados en MJ.

Tabla 10

Demanda energética acumulada para el escenario 2.

Categorías de Impacto	Escenario 2		
	Producción de resina 25% reciclada	Producción de resina 75% virgen	Transformación
Recursos energéticos no renovables fósiles	34.1	652.2	791.3
Recursos energéticos no renovables nuclear	2.7	27.3	33.0
Recursos no renovables bosque primario	0.0	0.0	0.0
Recursos renovables biomasa	1.1	4.5	85.9
Recursos renovables geotérmicos	0.0	0.2	0.3
Recursos renovables solar	0.1	0.0	0.1
Recursos renovables agua	1.3	12.8	76.8
Recursos renovables viento	0.3	1.6	2.5
Total, gasto energético	1728.3 MJ/1000 botellas		

La demanda energética acumulada, en el caso de la categoría de impacto recursos energéticos no renovables fósiles, se obtiene una diferencia significativa en los procesos de producción de resina 25% reciclada se obtuvo 34.1 MJ/1000 botellas a diferencia de la producción de 75% resina reciclada con 652.2 MJ/1000botellas.

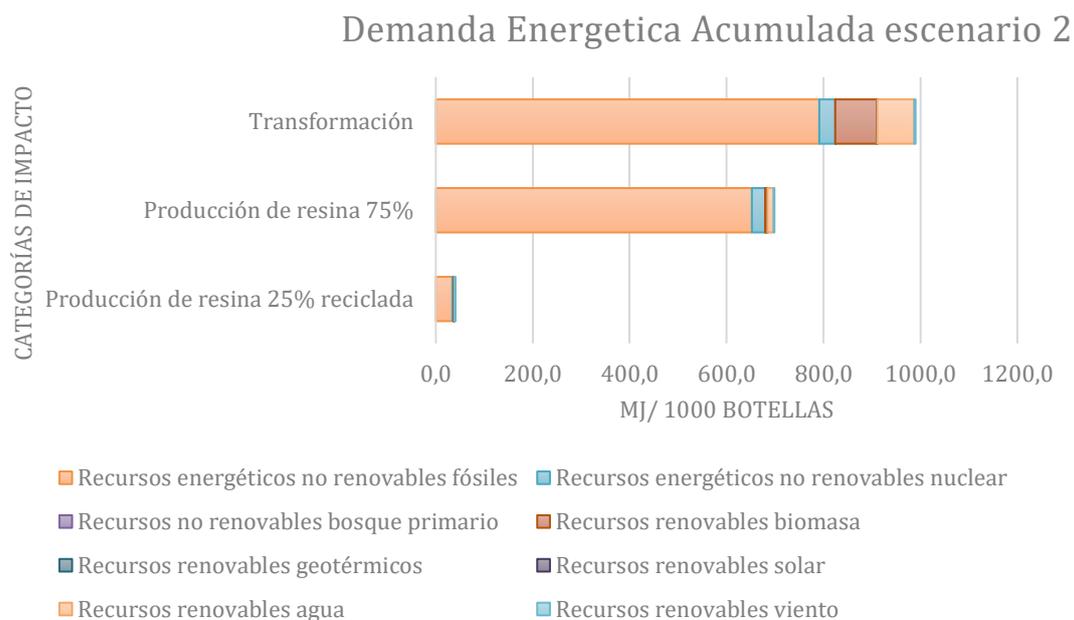


Figura 17. Demanda energética acumulada escenario 2.

4.3. Escenario 3: Botella 50% reciclada.

En el caso del escenario para el 50% de material reciclado, los resultados de los kg de $CO_{2\ eq}$, se presentan a continuación.

Tabla 11

Emisiones de kg de $CO_{2\ eq}$ en el escenario 3.

Escenario 3		
Proceso	Cantidad	Unidad
Producción resina 50% reciclada	2.89	kg de $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas
Producción resina 50% virgen	15.41	kg de $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas
Transformación botellas 50% reciclada	7.51	kg de $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas
Total, kg de $CO_{2\ eq}$	25.82	kg de $CO_{2\ eq}$/1000 botellas

CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 3

■ Producción resina 50% reciclada ■ Producción resina 50% virgen
■ Transformación botellas 50% reciclada

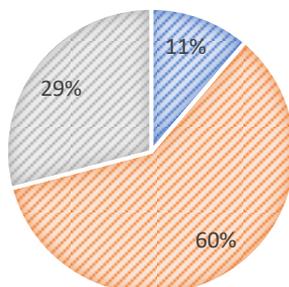


Figura 18. Cambio climático escenario 3.

En el escenario 3 para la categoría de cambio climático se obtuvo 2.89 kg de $CO_2 eq$ para la producción de botellas PET con el 50% de material reciclado, con una reducción significativa frente a la producción de materia prima virgen que fue de 15.41 kg de $CO_2 eq$. La producción de resina virgen en el escenario 3 contribuyó con el 60% de la emisión de gases de $CO_2 eq$.

En el caso del gasto energético acumulado se presentan los resultados en la tabla 12.

Tabla 12

Demanda energética acumulada para el escenario 3.

Categorías de Impacto	Producción de resina 50% reciclada	Escenario 3		Total
		Producción de resina 50% virgen	Transformación	
Recursos energéticos no renovables fósiles	26.3	434.4	106.4	567.1
Recursos energéticos no renovables nuclear	0.9	18.2	3.1	22.2

Recursos no renovables bosque primario	0.0	0.0	0.0	0.0
Recursos renovables biomasa	2.8	3.0	80.4	86.2
Recursos renovables geotérmicos	0.0	0.1	0.0	0.1
Recursos renovables solar	0.0	0.0	0.0	0.0
Recursos renovables agua	7.3	8.5	63.1	78.9
Recursos renovables viento	0.1	1.1	0.6	1.8
Total, gasto energético	756.3 MJ/ 1000 botellas			

El gasto energético total para el escenario 3 es de 756.3 MJ, en el recurso energético no renovables fósiles de la producción de resina 50% reciclada se obtiene 26.3 MJ en comparación de los 434.4 MJ necesarios para la producción del 75% resina virgen debido a la fuente de energía utilizada para el proceso de transformación.

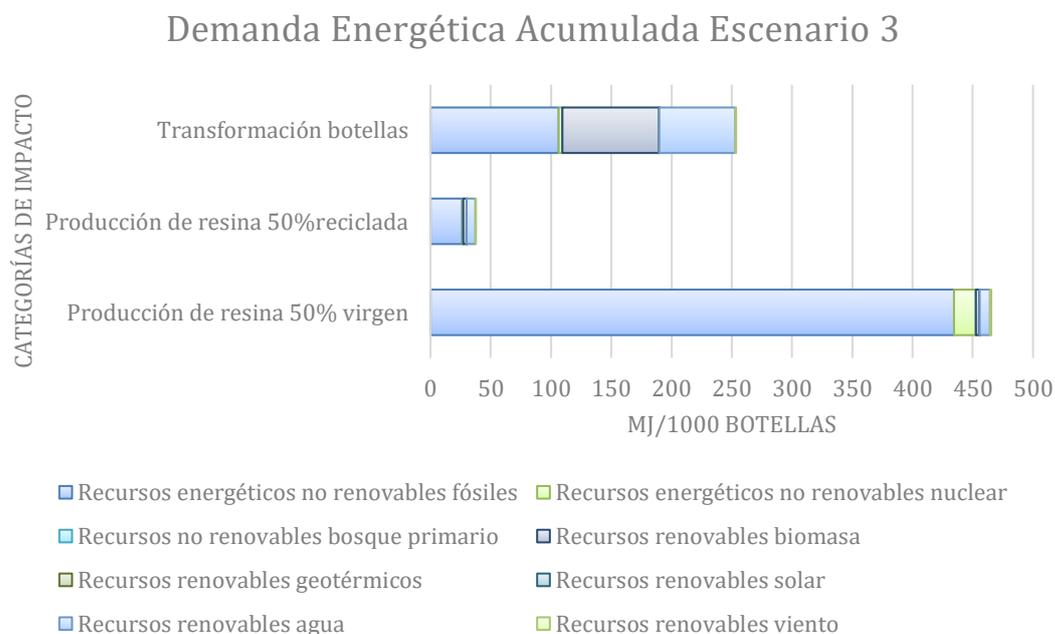


Figura 19. Demanda energética acumulada escenario 3.

El escenario 3, la mayor contribución de la demanda energética acumulada fue en la producción de resina 50% virgen con 434.4 MJ/1000 botellas.

4.4. Escenario 4: Botella 100% reciclada.

El escenario 4 de 100% resina reciclada para la categoría de cambio climático kg de $CO_2 eq$ del método de impacto Récipe, se presentan los resultados a continuación en la tabla 13.

Tabla 13

Emisiones de kg de $CO_2 eq$ en el escenario 4.

Escenario 4		
Proceso	Cantidad	Unidad
Producción resina 100% reciclada	11.256	kg de $CO_2 eq/1000$ botellas
Transformación botellas 100% reciclada	7.377	kg de $CO_2 eq/1000$ botellas
Total, kg de $CO_2 eq$	18.6331	kg de $CO_2 eq/1000$botellas

CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 4

■ Producción resina 100% reciclada ■ Transformación resina 100% reciclada

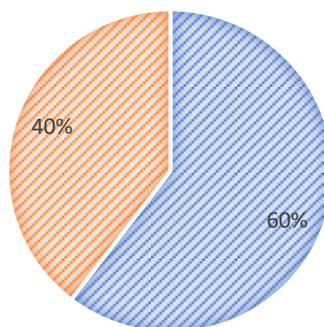


Figura 20. Cambio climático escenario 4.

Para el escenario 4 se obtiene 25.82 kg de $CO_2 eq/1000$ botellas, considerando el escenario de 100% materia prima reciclada. El proceso de transformación contribuye con el 60% de la emisión de gases de $CO_2 eq$.

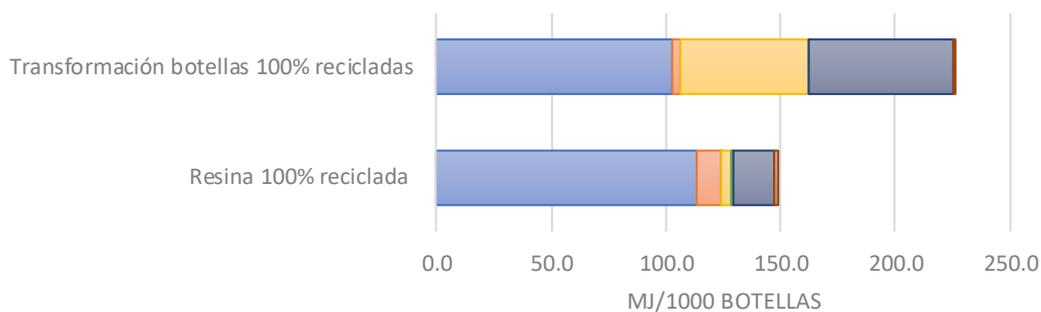
Para la demanda energética acumulada, en el escenario 4 se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla 14, expresados en MJ.

Tabla 14

Demanda energética acumulada escenario 4.

Escenario 4			
Categorías de Impacto	Resina 100% reciclada	Transformación	Total
Recursos energéticos no renovables fósiles	113.6	103.0	216.6
Recursos energéticos no renovables nuclear	10.9	3.03	13.9
Recursos no renovables bosque primario	0.0	0.0	0.0
Recursos renovables biomasa	4.2	56.7	60.9
Recursos renovables geotérmicos	0.2	0.0	0.2
Recursos renovables solar	0.1	0.0	0.1
Recursos renovables agua	18.5	63.0	81.5
Recursos renovables viento	1.2	0.6	1.8
Total, gasto energético		375 MJ/1000 botellas	

Demanda Energética Acumulada Escenario 4



- Recursos energéticos no renovables fósiles
- Recursos energéticos no renovables nuclear
- Recursos no renovables bosque primario
- Recursos renovables biomasa
- Recursos renovables geotérmicos
- Recursos renovables solar
- Recursos renovables agua
- Recursos renovables viento

Figura 21. Demanda energética acumulada escenario 4.

La energía fósil consumida para el escenario 4, se observa mediante la figura 21, donde se observa que el mayor consumo de energía fue en la producción de resina 100% reciclado proceso que más contribuye a la demanda energética acumulada.

4.5. Comparación entre escenarios.

4.5.1. Emisiones categoría cambio climático.

El resultado de emisiones de carbono equivalente en cada escenario se presenta a continuación en la figura 22.

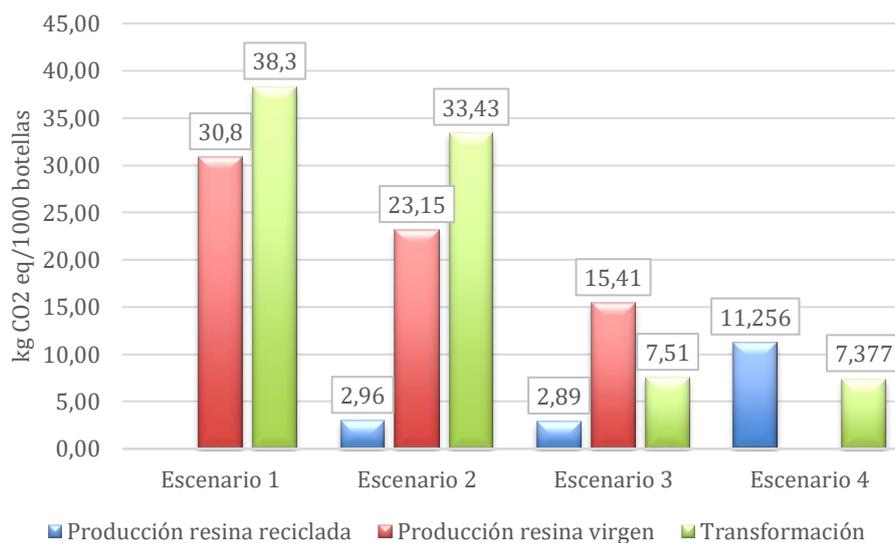


Figura 22. Emisión de kilogramos de $CO_{2\ eq}$ en cada escenario.

La figura 22 describe los resultados de las comparaciones de las emisiones de $CO_{2\ eq}$ para los escenarios, en el escenario 2 se obtiene 59.5 de kg de $CO_{2\ eq}$ para las 1000 botellas, lo que quiere decir que en comparación con el escenario 1 se redujo 9.56 kg de $CO_{2\ eq}$.

Para el escenario 1 en todo el proceso se obtiene 69.1 de kg de $CO_{2\ eq}$ frente al escenario 4 con material 100% reciclado con tan solo 18.6 kg de $CO_{2\ eq}$ mientras más material reciclado mayor es el ahorro de emisión de gases, en el escenario 3 se obtuvo un total de 25.82 kg de $CO_{2\ eq}$, el mejor escenario de ahorro de emisión de gases fue el 4 de 100% material reciclado tan solo se obtuvo 18.6 kg de $CO_{2\ eq}$, lo que quiere decir que a mayor material reciclado menor es la emisión de gases.

La demanda energética acumulada por escenario se presenta a continuación en la figura 23.

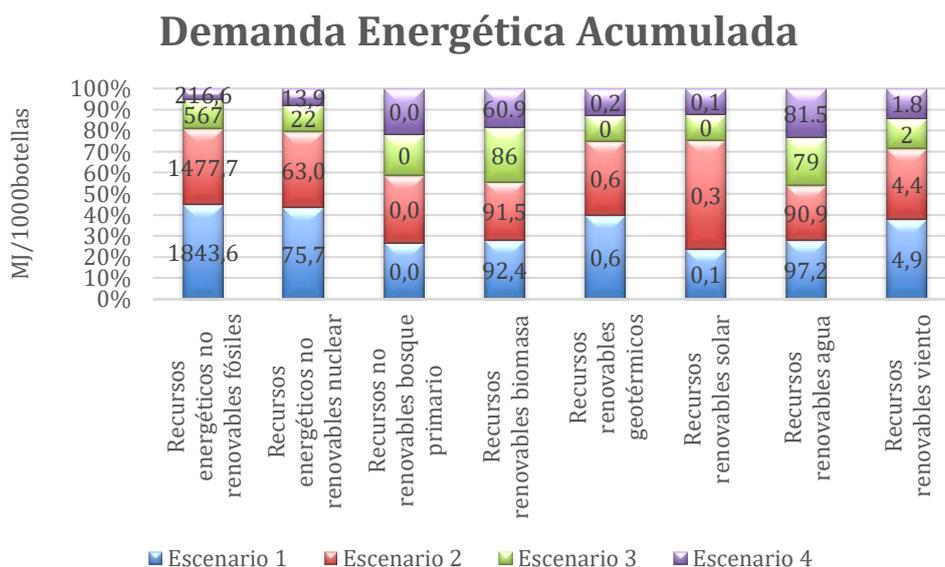


Figura 23. Demanda energética acumulada por escenarios.

La energía no renovable fósil consumida como el petróleo, gas natural y carbón fue el tipo de energía que más se consumió en el escenario 1 que fue de 1843.6 MJ/1000 botellas, en comparación con el escenario 2 de 25% de materia prima reciclada que fue de 1477.7 MJ/1000 botellas, las diferencias entre estos escenarios no es significativa debido a que en el escenario 2 se contempló el 75% de producción de materia virgen, el ahorro de energía entre el escenario 1 y 2 fue de 365.9 MJ/ 1000 botellas en la categoría de recursos energéticos no renovables fósiles. El ahorro energético entre el escenario de 100% materia virgen y el 50% de materia reciclada fue de 1276.5 MJ/1000 botellas, en cuanto al ahorro de energía del escenario 1 frente al escenario 4 que fue de 1627MJ/1000 botellas.

Cambio climático escenario 1

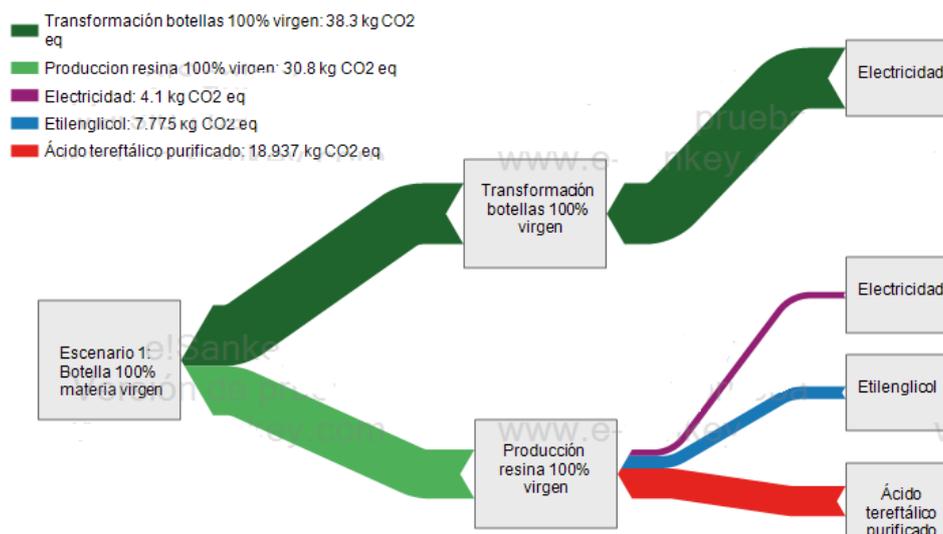


Figura 24. Diagrama de Sankey cambio climático escenario 1.

Como se observa en la figura 24 el diagrama de sankey para el escenario 1 del apartado de cambio climático donde se obtiene el 38.3 kg $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas en la transformación, en la figura 25 se observa el apartado de cambio climático para el escenario 4 donde se obtiene la mayor emisión de gases en la etapa de producción de resina reciclada 100% reciclada con una contribución solo del 11.256 kg $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas a comparación del escenario 1, para la etapa de producción de resina 100% virgen que contribuyó con el 30.8 kg $CO_{2\ eq}$ /1000 botellas.

Cambio climático escenario 4

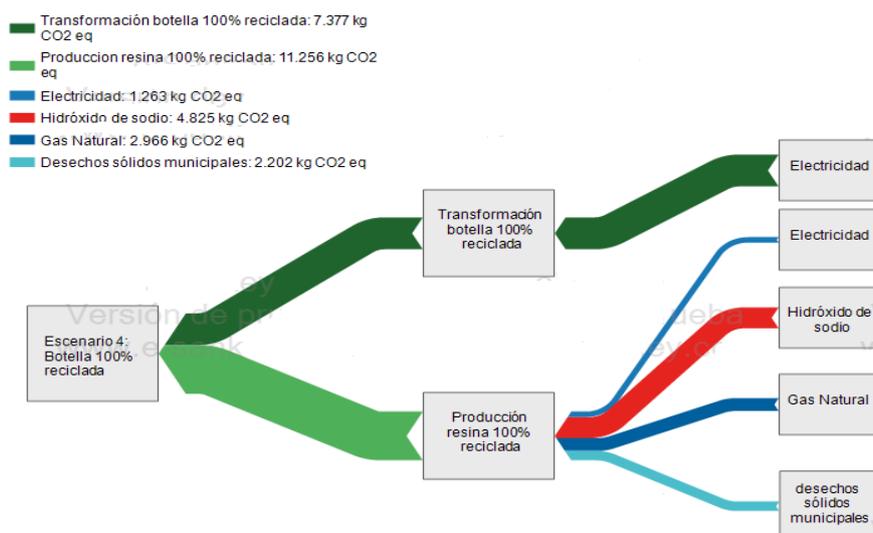


Figura 25. Diagrama de Sankey cambio climático escenario 4.

Demanda energética acumulada escenario 1

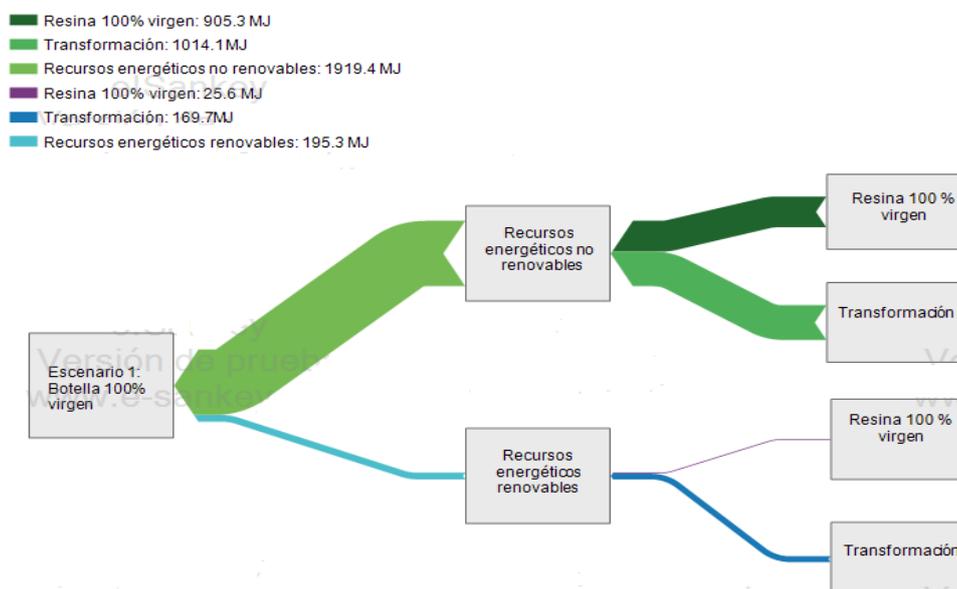


Figura 26. Diagrama de Sankey demanda energética acumulada escenario 1.

En el diagrama de sankey en la figura 26, se observa la demanda energética acumulada para el escenario 1 con un gasto energético de 1919.4 MJ/1000 botellas para el apartado de recursos energéticos no renovables a comparación del escenario 4, en la figura 27 se observa un gasto energético de 230.53 MJ/1000 botellas en los recursos energéticos no renovables.

Demanda energética acumulada escenario 4

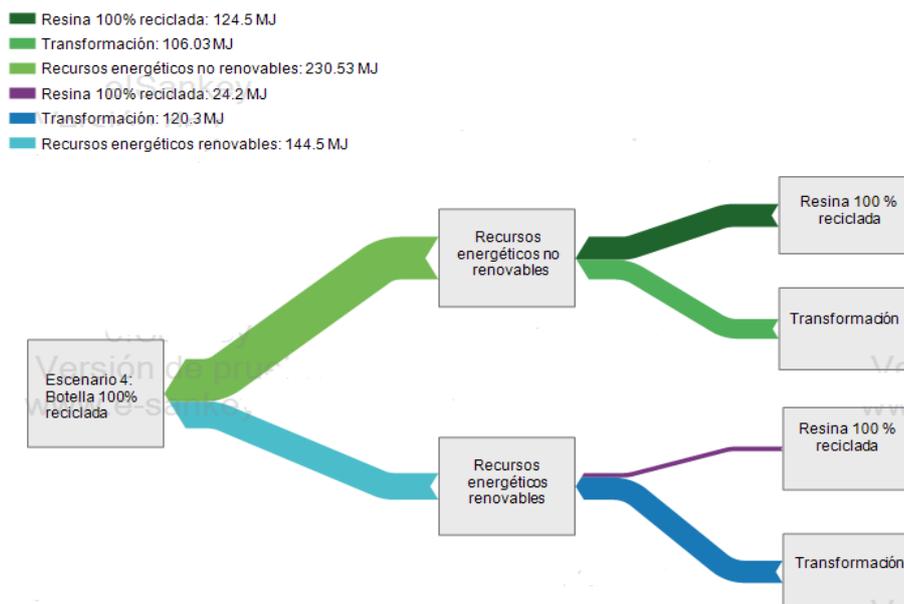


Figura 27. Diagrama de Sankey demanda energética acumulada escenario 4.

RECURSOS ENERGÉTICOS NO RENOVABLES FÓSILES

■ Escenario 1 ■ Escenario 2 ■ Escenario 3 ■ Escenario 4

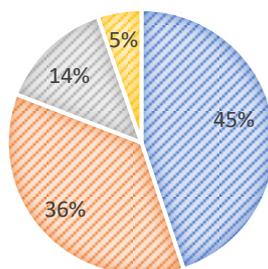


Figura 28. Demanda energética acumulada, recursos energéticos no renovables fósiles por escenarios.

Como se puede ilustra en la figura 28, el mayor gasto energético de recursos no renovables fósiles se produce en el escenario 1 que contempló 100% materia virgen con un aporte del 45%, seguido del escenario 2 con un gasto energético de recursos no renovables fósiles de 1477.7 MJ/1000 botellas, lo que contribuyó con un gasto energético del 36% en comparación con los demás escenarios.

5. DISCUSIÓN

Los resultados fueron comparados entre escenarios propuestos para determinar el mejor en escenario para la reducción de emisión de gases y consumo de energía. El estudio evaluó el gasto energético y emisiones de CO_2_{eq} mediante el análisis de ciclo de vida para cuatro escenarios diferentes para la producción de 1000 botellas PET para las categorías de cambio climático, el proceso que más contribuye fue la etapa de transformación a botellas, estos resultados son concordantes con el estudio realizado por Gleick y Cooley (2009); donde se menciona de igual manera que el consumo de energía para la fase de transformación es la que más energía demanda. Según Papong et al. (2013); la energía que se requiere para para fabricar 1000 botellas fue de 2120 MJ, resultados similares que se obtuvieron en el escenario 1 que fue de 2117.4 MJ.

La demanda acumulada de energía en los 4 escenarios propuestos fue mayor en la etapa de producción de resina virgen a comparación con la resina reciclada, mismo resultado reporta Yahya Saleh (2016); que compara la energía obtenida de los recursos energéticos no renovables de diferentes sistemas de embalaje entre los que se encuentra el PET, con una alta demanda de energía en la etapa de producción de botellas de fuentes vírgenes.

En este estudio se contempló el uso de material PET reciclado para la producción de nuevas botellas evidenciando de esta manera la reducción de emisión de gases mientras mayor es el porcentaje de material reciclado mayor es la reducción de emisión de gases (Simon, Amor, y Földényi, 2016), La categoría de cambio climático para el escenario 1 fue de 69.1 de $kg CO_2_{eq} /1000$ botellas disminuyendo así un 27% en comparación del escenario 4 con material 100% reciclado, los mismos resultados reporta Shen et al (2011); con el reciclaje de botella a botella.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Al analizar el ciclo de vida de los envases PET y evaluar los procesos de producción de resina con material virgen, reciclado y fabricación de botellas, el sustituir material reciclado a un producto, representa beneficios ambientales mediante una reducción de consumo de energía y reducción de gases, por lo tanto el esquema del reciclaje por sustitución de materia virgen en Ecuador representa ventajas ambientales importantes en el mercado, disminuyendo de esta manera el uso de los recursos naturales y emisión de gases que generan impactos ambientales importantes como el cambio climático, por lo cual se debería implementar la incorporación de material reciclado en la fabricación de productos nuevos.

Aplicando mezclas de material reciclado y virgen para la fabricación de botellas se puede obtener beneficios ambientales, el uso de un análisis del ciclo de vida de un producto es importante para determinar que productos y cuál es la mejor forma de gestionar los residuos producidos para introducirlos nuevamente a la cadena productiva mediante el reciclaje, evitando el uso excesivo de materias primas vírgenes.

Se puede concluir que la opción de la producción de botellas con material reciclado resulta en una reducción de emisiones, esto quiere decir que la opción del reciclaje es un beneficio ambiental, evitando las cargas de fabricación de PET a partir de petróleo, los resultados obtenidos demostraron que la gestión de residuos canalizando al reciclaje de botella a botella de PET puede reducir significativamente la emisión de gases de CO_2_{eq} y demanda de energía. Además, todo el proceso para la obtención de botellas requiere emplear de energía, por lo que se podría examinar fuentes de energía renovable.

El proceso de producción de botellas en Ecuador empieza desde la importación de preformas, por la falta de producción de resina en el país, esto causa la

contribución tanto a la demanda energética acumulada por el consumo de recursos no renovables como diésel utilizado en forma de combustible y emisiones de kg de CO_{2eq} , mediante el transporte que para este estudio fue contemplado desde Perú y fue integrado al proceso de producción de resina virgen. El ahorro energético entre el escenario 1 de materia 100% virgen y escenario 2 de 25% materia reciclada fue de 365.9 MJ/1000 botellas este resultado no fue significativamente importante en comparación con los otros escenarios debido a que el escenario 2 contempló el uso del 75% de materia virgen. El mejor escenario resulto ser el 4 de 100% materia reciclada con tan solo 18.63 kg de CO_{2eq} y 216.6 MJ/1000 botellas en la categoría de recursos energéticos no renovables fósiles.

6.2. Recomendaciones

Se considera que, durante el estudio, la mayoría de los datos se recopilaron de publicaciones y base de datos Ecoinvent que está adaptada a la industria europea por lo que podría variar frente a la problemática en Ecuador, se sugiere realizar posteriores estudios con mayor confiabilidad de datos, para conformar el inventario de ciclo de vida acoplado a una industria en particular. Sin embargo, se recomienda realizar más investigaciones para comprender dinámica de todo el ciclo de vida de las botellas PET desde la producción, uso, consumo y disposición final, es decir, un estudio de la cuna a la tumba.

Finalmente, se recomienda que se investiguen otras formas de disposición final y recuperación de botellas PET mediante recuperación de energía por incineración y reciclaje de circuito abierto para la producción de fibras textiles, por último, se sugiere hacer estudios frente a otros materiales como polipropileno y polietileno.

REFERENCIAS

- Acosta, J., y Prada, R. (2017). El Moldeo en el Proceso de Inyección para el Logro de Objetivos Empresariales. *Dimensión empresarial*, 15 (1), 157-168.
- Aguilar, E., Rivera, A. y Forcada, A. (2013). Estudio de Análisis de Ciclo Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietileno tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático, México (Vol. 1). Recuperado el 12 de junio de 2020 de http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2013_acv_pet.pdf
- Arandes, J., Bilbao, J. y López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. Recuperado el 11 de junio de 2020 de <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR04/Danilo2004.pdf>
- Arca Continental. (s. f.). Aumenta Arca Continental Capacidad De Producción En Ecuador. Recuperado el 14 de junio de 2020 de <http://www.arcacontal.com/sala-de-prensa/comunicados/aumenta-ac-capacidad-de-produccion-en-ecuador.aspx>
- Arca Continental. (2016). Informe Anual 2016. Recuperado el 19 de junio de 2020 de <http://www.arcacontal.com/media/223048/informeanual2016acesp.pdf>
- Arca Continental. (2019). Reporte Anual Integrado 2019. Recuperado el 11 de junio de 2020 de <http://www.arcacontal.com/media/358432/informeanualintegrado2019esp.pdf>
- Ávila, F., Ojeda, S., Cruz, S., Taboada, P., y Aguilar, Q. (2013). Los pepenadores en la recuperación de reciclables en sitios de disposición final en Baja California, México. Recuperado el 27 de junio de 2020 de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37029665007.pdf>
- Awaja, F. y Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453-1477. Doi.10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005

- Beltrán, M. y Marcilla, A. (2012). Bases del procesado de polímeros. Tecnología de polímeros: procesado y propiedades, 86-100. Recuperado el 10 de junio de 2020 de <http://iq.ua.es/TPO/Tema3.pdf>
- BID. (2017). Agricultura y seguridad alimentaria. Agricultura. Doi.10.0251-1371
- Bordival, M., Schmidt, F., Maoult, Y. y Velay, V. (2009). Optimization of Preform Temperature Distribution for the Stretch-Blow Molding of PET Bottles: Infrared Heating and Blowing Modeling. *Polymer Engineering and Science*, (49), 783-793. Doi.10.1002/pen
- Cardona, C. (2012). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. Recuperado el 12 de junio de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/26496616_Analisis_de_ciclo_de_vida_y_su_aplicacion_a_la_produccion_de_bioetanol_Una_aproximacion_cualitativa
- CEPAL. (2013). Prácticas públicas y privadas para reducir las huellas ambientales en el comercio internacional. Recuperado el 12 de junio de 2020 de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37091/1/S1420337_es.pdf
- COBOS, R. (2016). El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales. *Boletín Sociedad Española Hidrología Médica*, 31(2), 179-190. Doi.10.23853/bsehm.2017.0212
- Comisión Europea. (2013). 2013/179/UE: Recomendación de la Comisión de 9 de abril de 2013 sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida. Recuperado el 6 de junio de 2020 de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/93cb8358-b80d-11e2-ab01-01aa75ed71a1/language-es>
- Changwichan, K. y Gheewala, S. (2020). Choice of materials for takeaway beverage cups towards a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*. Doi.10.1016/j.spc.2020.02.004

- Chen, L., Pelton, R. y Smith, T. (2016). Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137, 667-676. Doi.10.1016/j.jclepro.2016.07.094
- CPME. (2017). Ecoprofile: Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade) CPME. The Committee of PET Manufacturers in Europe, (June). Recuperado el 25 de junio de 2020 de <https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles>
- Durán, D. (2012). El problema logístico de la recolección de PET en México. *Upiicsa*, XX, VIII (58), 40-52. Recuperado el 02 de junio de 2020 de https://www.academia.edu/25840052/EL_PROBLEMA_LOG%3%8DSTICO_DE_LA_RECOLECCI%3%93N_DE_PET_EN_M%3%89XICO
- El telégrafo. (2014). La Coca Cola se embotellará con material reciclado. Recuperado el 08 de junio de 2020 de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/la-coca-cola-se-embotellara-con-material-reciclado>
- El Telégrafo. (2014). En el país se generan alrededor de 11.341 toneladas diarias de residuos. Recuperado el 10 de junio de 2020 de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/ecuador-produjo-mas-de-1-400-millo>. Recuperado de
- El Telégrafo. (2019). El control del plástico avanza de forma lenta. Recuperado el 08 de junio de 2020 de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/control-plastico-ordenanza-modelo-quito-ecuador>
- El Universo. (2010). Embotelladora mexicana Arca compra parte de empresa ecuatoriana. Recuperado el 02 de junio de 2020 de <https://www.eluniverso.com/2010/09/09/1/1356/embotelladora-mexicana-arca-compra-parte-empresa-ecuatoriana.html>
- European Commission. (2004). Etapas de un ACV, 2-5. Recuperado el 16 de junio de 2020 de

http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFileyrep=fileyfil=ECOIL_Ciclo_de_Vida.pdf

- Fröhlich, T., Ruiz, E., Valsasina, L., y Johnson, E. (2017). polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade-GLO: Ecoinvent 3.6 dataset documentation. Recuperado el 28 junio el 2020 de <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2fSearch%2fIndex>
- García, S. (2009). Referencias históricas y evolución de los plásticos. Recuperado el 15 de junio de 2020 de <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/ENE09/garcia.pdf>
- Gere, D., y Czigany, T. (2020). Future trends of plastic bottle recycling: Compatibilization of PET and PLA. *Polymer Testing*, 81(October 2019), 106160. Doi.10.1016/j.polymeresting.2019.106160
- Gironi, F. y Piemonte, V. (2011). Life Cycle Assessment of Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Bottles for Drinking Water. *The Global Home of Chemical Engineers*, 30(3), 459-468. Doi.10.1002/ep
- Hernandez, J. (2013). Nota Técnica: Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET. Recuperado el 27 de junio de <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732640006.pdf>
- Hischier, R. y Classen, M. (1997). Blow moulding production GLO: Ecoinvent 3.6 dataset. Recuperado el 26 de junio de 2020 de <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2fSearch%2fIndex>
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Nemecek, T. (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2. Recuperado el 04 de junio de 2020 de https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G. y Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint

- and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 138-147. Doi.10.1007/s11367-016-1246-y
- INEC. (2014). Estadística de Información Ambiental Económica en gobiernos Autónomos descentralizados Municipales. Doi.10.1016/j.gaitpost.2018.03.005
- INEC. (2018). la última estadística de información ambiental: Cada ecuatoriano produce 0,58 kilogramos de residuos sólidos al día. Recuperado el 17 de junio de 2020 de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/segun-la-ultima-estadistica-de-informacion-ambiental-cada-ecuatoriano-produce-058-kilogramos-de-residuos-solidos-al-dia/>
- IRR. (2015). Reciclaje Inclusivo y Recicladores de Base en el Ecuador, 72. Recuperado el 16 de junio de 2020 de <https://reciclajeinclusivo.org/wp-content/uploads/2016/04/Reciclaje-Inclusivo-y-Recicladores-de-base-en-EC.pdf>
- Jang, Y., Lee, G., Kwon, Y., Lim, J. y Jeong, J. (2020). Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 158(December 2019), 104798. Doi.10.1016/j.resconrec.2020.104798
- Kägi, T., Muñoz, I. y Ruiz, E. (2014). polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, recycled - GLO: Ecoinvent 3.6 dataset documentation. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Account/LogOn?ReturnUrl=%2fSearch%2fIndex>
- Kang, D. Auras, R. y Singh, J. (2017). Life cycle assessment of non-alcoholic single-serve polyethylene terephthalate beverage bottles in the state of California. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 45-52. Doi.10.1016/j.resconrec.2016.09.011
- Laura, M. y Ruiz, M. (2009). Reciclaje de Botellas PET para obtener la fibra poliéster. *Ingeniería Industrial*, 27, 123-137. Recuperado el 20 de junio de 2020 de <http://www.redalyc.org/pdf/3374/337428493008.pdf>
- Lepoittevin, B. y Roger, P. (2011). Poly(ethylene terephthalate). (S. Thomas y V. P.M., Eds.), *Handbook of Engineering and Specialty*

Thermoplastics Polyethers and Polyesters, Volume 3.
Doi.10.1002/9781118104729.ch4

- Matouq, M. (2000). A case-study of ISO 14001-based Environmental Management System implementation in the People's Republic of China. *Local Environment*, 5(4), 415-433. Doi.10.1080/713684893
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2007). Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers. Recuperado el 24 de junio de 2020 de <http://www.prtr-es.es/data/images/PRODUCCIÓN-DE-POLÍMEROS-1BDCAAE0950F2E40.pdf>
- Ministerio del Ambiente- PNGIDS. (2013). Diagnóstico de la Cadena de Gestión Integral de Desechos. Recuperado el 14 de junio de 2020 de <https://www.vicepresidencia.gob.ec/wp-content/uploads/2015/08/Resumen-Cadena-de-Gestion-de-Residuos-S%C3%B3lidos.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (s. f.). Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS ECUADOR. Recuperado el 23 de junio de 2020 de <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Ministerio del Ambiente. (2012). Ecuador incrementó la recolección de Botellas PET. Recuperado el 14 de junio de 2020 de <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-incremento-la-recoleccion-de-botellas-pet-en-2012/>
- Ministerio del Ambiente. (2015). Gestión Integral De Desechos Sólidos. Recuperado el 28 de junio de 2020 de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/PNGIDS1.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2020). Ficha Informativa de Proyecto Subsecretaría de Calidad Ambiental Dirección Nacional de Control Ambiental PROYECTO: K009 MAE - Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos. Recuperado el 11 de junio de 2020 de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/01/PNGIDS-ENERO-2020.pdf>

- Ministerio de Comercio Exterior. (2017). Nomenclatura De Designación Y Codificación De Mercancías Del Ecuador. Recuperado el 24 de junio de 2020 de <http://www.pudeleco.com/files/a17026a.pdf>
- Niembro, J., y Gonzalez, M. (2008). Categorías De Evaluación De Impacto De Ciclo De Vida Vinculadas Con Energía: Revisión Y Prospectiva. 12th International Conference on Project Engineering, 1180-1190. Recuperado el 27 de junio de 2020 de [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7767/Niembro_1180_1190 \[1\].pdf](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7767/Niembro_1180_1190 [1].pdf)
- Olivera, A. Stella, C. y Saizar, C. (2016). Innotec gestión. INNOTEC Gestión, 7, 20-27. Recuperado el 08 de junio de <https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC-Gestion/article/view/364>
- Papong, S., Malakul, P., Trungkavashirakun, R., Wenunun, P., Chom-In, T., Nithitanakul, M. y Sarobol, E. (2014). Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 65, 539-550. Doi./10.1016/j.jclepro.2013.09.030
- Pham, X., Thibault, F. y Lim, L. (2004). Modeling and simulation of stretch blow molding of polyethylene terephthalate. *Polymer Engineering and Science*, 44(8), 1460-1472. Doi.10.1002/pen.20142
- Ponce, J. (2015). Residuos sólidos en América Latina: gestión, políticas públicas y conflictos socioambientales. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 17/ 1-3. Doi.10.17141/letrasverdes.17.2015.1627
- PRO ECUADOR. (2018). Perfil Logístico Perú. Recuperado el 11 de junio de 2020 de https://www.academia.edu/25840052/EL_PROBLEMA_LOG%C3%8DSTICO_DE_LA_RECOLECCI%C3%93N_DE_PET_EN_M%C3%89XICO
- Quintero, R., Berdugo, L. y Simancas, R. (2017). Productividad y rentabilidad de las queserías informales en las subregiones queseras del Departamento del Atlántico. *Producción + Limpia*, 12(1), 97-103. Doi.10.22507/pml.v12n1a10

- Reinold, S., Herrera, A., Hernández, C. y Gómez, M. (2020). Plastic pollution on eight beaches of Tenerife (Canary Islands, Spain): An annual study. *Marine Pollution Bulletin*, 151(September 2019), 110847. Doi.10.1016/j.marpolbul.2019.110847
- Revista Lideres. (2018). La industria del plástico se mueve al ritmo de unas 600 empresas. Recuperado el 29 de junio de 2020 de <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-plastico-inversion-innovacion-ritmo.html#:~:text=La industria de plástico en,exporta en medio de desafíos.ytext=Actualmente genera más de 19,unas 500 000 toneladas anuales.>
- Rorrer, N., Nicholson, S., Carpenter, A., Bidy, M., Grundl, N. y Beckham, G. T. (2019). Combining Reclaimed PET with Bio-based Monomers Enables Plastics Upcycling. *Joule*, 3(4), 1006-1027. Doi.10.1016/j.joule.2019.01.018
- Saleh, Y. (2016). Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine. *Journal of Cleaner Production*, 131, 28-42. Doi.10.1016/j.jclepro.2016.05.080
- Shen, L., Nieuwlaar, E., Worrell, E., y Patel, M. (2011). Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: Change-oriented effects. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), 522-536. Doi.10.1007/s11367-011-0296-4
- Simon, B., Amor, M. Ben, y Földényi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112, 238-248. Doi.10.1016/j.jclepro.2015.06.008
- SIPA. (2016). La línea híbrida SIPA de soplado y llenado de botellas en ARCA CONTINENTAL. Recuperado el 25 de junio de 2020 de <https://www.sipasolutions.es/es/referencias/la-linea-hibrida-sipa-de-soplado-y-llenado-de-botellas-en-arca-continental-argentina>
- Starlinger. (s. f.). Recycling technology for PET flakes. Recuperado El 22 de junio de 2020 de <https://www.starlinger.com/es/recycling/recostar-linea-de-productos/recostar-pet-para-contacto-alimentario/>

- Suárez, D. (2017). Centro Integral de Reciclaje. Recuperado el 30 de junio de 2020 de <https://www.computerworld.com.ec/files/Plugged299.pdf>
- Texto Unificado De Legislación Secundaria de Medio Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial No. 061, 1-80. Recuperado el 06 de junio de 2020 de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155124.pdf>
- Valderrama, M., Guzmán, L., Osorio, J. y Peña, C. (2018). Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(1), 67-74. Doi.10.22507/rli.v15n1a6
- Vlachopoulos, J., y Strutt, D. (2003). Polymer processing. *Materials Science and Technology*, 19(9), 1161-1169. Doi.10.1179/026708303225004738
- Yuridia, S., Rene, C., Ana, J., María, S., José, R. y Julio, R. (2017). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. Rwcuperado el 23 de junio de 2020 de <http://www.reibci.org/publicados/2017/feb/2100108.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de Sankey para el proceso de producción de Resina, escenario 1, para el apartado de cambio climático

